



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ STANDARDU WIFI IEEE 802.11N

VERIFICATION OF PROPERTIES OF WIFI IEEE 802.11N

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Alexa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zenon Kuder, MSc

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jan Alexa

ID: 98277

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Ověření vlastností standardu WiFi IEEE 802.11n

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s rodinou standardů IEEE 802.11 (WiFi), zejména s moderními standardy 'n' a 'ac' a staršími standardy 'b', 'g', 'a'. Na základě získaných poznatků připravte seznam klíčových rozdílů mezi nimi s ohledem na inovace v novějších generacích. Věnujte pozornost zejména použití technologie MIMO. Navrhněte laboratorní úlohu pro výuku na bakalářském stupni studia, která by demonstrovala použití technologie MIMO a další významné vlastnosti standardu 802.11n. Připravte jednoduchou aplikaci, která by tyto rozdíly demonstrovala, např. v prostředí MATLAB nebo LabVIEW, a jejíž výsledky by bylo možné porovnat s měřením.

Připravte navrženou laboratorní úlohu s podrobným návodem (tzv. vzorový protokol) pro využití ve výuce a pro seznámení se zařízením. Použijte měřicí přístroje a hardware pro standard 802.11n dostupný v laboratoři mobilních komunikací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GAST, M. 802.11n: a survival guide. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2012.

[2] LABIOD, H., AFIFI, H., De SANTIS, C. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX. Dordrecht: Springer, 2007.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 16.8.2016

Vedoucí práce: Ing. Zenon Kuder, MSc

Konzultant bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o bezdrátových systémech standardu IEEE 802.11. V práci jsou vysvětleny základní pojmy a principy, týkající se digitálních bezdrátových systémů. Práce je strukturovaná do 4 tematických celků, z nichž první je zaměřen na seznámení se se standardem Wi-Fi - IEEE 802.11 obecně. Druhá část obsahuje hlubší zaměření na moderní standardy 'n' a 'ac', kde jsou prezentovány hlavní rozdíly a inovace oproti starším standardům 'b', 'g', 'a'. Dále je v této části práce popsáno použití technologie MIMO. Třetí část obsahuje analýzu a popis aplikace, která je součástí bakalářské práce. Čtvrtá část práce je detailně zaměřena na návrh laboratorní úlohy pro výuku na bakalářském stupni studia, která demonstruje použití technologie MIMO.

KLÍČOVÁ SLOVA

Wi-Fi, 802.11n, 802.11ac, OFDM, MIMO, přenosová rychlost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with wireless systems of IEEE 802.11 standards. This thesis explains the fundamental terms and principles, which are relating to digital wireless systems. This thesis is structured into four thematic units. The first chapter discusses an introducing with Wi-Fi standard – IEEE 802.11 in general. Second part contains a deeper focus on modern standards 'n' and 'ac', showing the main differences and innovation compared to older standards 'b', 'g', 'a'. Further in this part of the thesis is described using of MIMO technology. The third chapter contains an analysis and description of the application, which is part of the thesis. The fourth part is detailed focused on the design of laboratory tasks for teaching at the undergraduate level, which demonstrates the use of MIMO technology.

KEYWORDS

Wi-Fi, 802.11n, 802.11ac, OFDM, MIMO, transmission speed

ALEXA, J. Ověření vlastností standardu Wi-Fi IEEE 802.11n. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 39 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zenon Kuder, MSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ověření vlastností standardu Wi-Fi IEEE 802.11n jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Zenonu Kuderovi, MSc., za umožnění práce na projektu, cenné rady, poskytnuté podněty a připomínky a odborné vedení při zpracování této práce a panu Ing. Jiřímu Milošovi, Ph.D. za cenné rady, poskytnuté podněty a připomínky.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Standardy sítí WLAN	2
1.1 Historie Wi-Fi	2
1.2 Současnost	3
1.3 Fyzické vrstvy rodiny standardů IEEE 802.11	4
1.3.1 DSSS, HR/DSSS.....	4
1.3.2 FHSS	4
1.3.3 OFDM	4
2 Moderní standardy WLAN dle IEEE 802.11n/ac	5
2.1 IEEE 802.11n.....	5
2.1.1 Vysílač dle standardu IEEE 802.11n	6
2.1.2 MIMO technologie	7
2.1.3 Šířka pásma.....	9
2.1.4 Kapacita kanálu.....	11
2.1.5 MCS schémata	13
2.1.6 Mnohonásobný přístup v síti.....	13
2.1.7 Beamforming	14
2.1.8 OFDM modulace	15
2.1.9 MIMO-OFDM	16
2.1.10 Kódování dat.....	17
2.1.11 Frame Aggregation	17
2.1.12 PLCP módy.....	18
2.1.13 Datové pole	18
2.2 IEEE 802.11ac	19
2.2.1 MU-MIMO	19
2.2.2 Šířka pásma.....	20
2.2.3 Beamforming	21

2.2.4	MCS schémata	24
2.2.5	VHT rámec	25
2.3	Hlavní rozdíly mezi standardy	26
3	Výuková aplikace	29
4	Laboratorní úloha	31
4.1	Analýza laboratorní úlohy	31
4.1.1	Blokové schéma	32
4.2	Sestavení laboratorní úlohy	32
4.3	Dosažené výsledky a naměřené hodnoty	35
4.3.1	Zobrazení kmitočtového spektra	35
4.3.2	Měření přenosové rychlosti systému MIMO	36
5	Závěr	38
	Literatura	40
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
A	Vzorové vypracování laboratorní úlohy	44
A.1	Zadání laboratorní úlohy	44
A.2	Teoretický úvod k laboratorní úloze a blokové schéma	44
A.3	Postup měření	45
B	Vzorový protokol	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Oficiální logo Wi-Fi.....	2
Obrázek 1-2 Logo Wi-Fi se všemi standardy	3
Obrázek 2-1 Model ISO/OSI	6
Obrázek 2-2 Blokové schéma vysílače	6
Obrázek 2-3 Model využití kanálů u systému MIMO (3×3)	8
Obrázek 2-4 Srovnání mnohonásobného datového toku MIMO a SISO	9
Obrázek 2-5 Srovnání struktury kanálů mezi 802.11a/g a 802.11n.....	9
Obrázek 2-6 Rozdíl mezi 20 MHz šířkou pásma a 40 MHz šířkou pásma	10
Obrázek 2-7 Mapa dostupných kanálů v kmitočtovém pásmu 5 GHz	10
Obrázek 2-8 Ukázka výpisu dostupných bezdrátových sítí ze zařízení Rocket M5	12
Obrázek 2-9 Znázornění vysílání všesměrového (omni) a s využitím Beamformingu ..	15
Obrázek 2-10 Spektrum signálu systému neortogonálního a ortogonálního	16
Obrázek 2-11 Rozdíl mezi Single-user MIMO a MU-MIMO.....	20
Obrázek 2-12 Rozložení šířek pásma v kmitočtovém spektru 5 GHz	21
Obrázek 2-13 Rozložení dostupných vysílacích kanálů	21
Obrázek 2-14 Terminologie beamformingu a jeho proces	22
Obrázek 2-15 Využití více antén; a) řídicí matice není aplikována; b) s řídicí maticí ...	23
Obrázek 2-16 Efekt řídicí matice	23
Obrázek 2-17 Vliv beamformingu na dosah signálu	25
Obrázek 2-18 Rozložení VHT rámce	25
Obrázek 3-1 Ukázka rozhraní programu	30
Obrázek 4-1 Blokové schéma zapojení pracoviště	32
Obrázek 4-2 Zapojení AP spolu s PC1	34
Obrázek 4-3 Zapojení PC2 s klientem a spektrálním analyzátozem.....	34
Obrázek 4-4 Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 20 MHz	35
Obrázek 4-5 Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 40 MHz	35

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry prokladače	7
Tabulka 2 Počet subnosných dle standardu a šířky pásma	10
Tabulka 3 Tabulka MCS indexů pro 1 prostorový stream.....	13
Tabulka 4 Předpoklad vývoje technologie 802.11ac	19
Tabulka 5 Hodnoty MCS pro standard IEEE 802.11ac	24
Tabulka 6 Rozdíl mezi maximálními přenosovými rychlostmi dle standardu	26
Tabulka 7 Srovnání maximální přenosové rychlosti pro stejnou šířku pásma	27
Tabulka 8 Porovnání maximální teoretické přenosové rychlosti v závislosti na standardu a šířce kmitočtového pásma	27
Tabulka 9 Rozdíl v šířce pásma vysílacího kmitočtu dle standardu	28
Tabulka 10 Podporovaná technologie u jednotlivých standardů	28
Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro různou šířku pásma	36
Tabulka 12 Změřené hodnoty přenosové rychlosti a určení MCS indexu pro nastavený útlum antén systému	37

ÚVOD

Bakalářská práce na téma Ověření vlastností standardu Wi-Fi IEEE 802.11n spadá do problematiky bezdrátové komunikace. Dle obecného rozdělení radiokomunikačních systémů se standardy rodiny IEEE 802.11 řadí mezi LAN (Local Area Network), konkrétně WLAN (Wireless LAN). WLAN sítě jsou výborným řešením problému poslední míle, což je propojení mezi koncovým bodem telekomunikační sítě (ústředna) a účastníkem, kde často není možné na dlouhé vzdálenosti dosáhnout velkých přenosových rychlostí. Systémy WLAN, jejichž největším zástupcem jsou systémy Wi-Fi jsou proto levným řešením pro připojení řady domácností k datové síti, bez nutnosti připojení k pevné lince. Nároky na bezdrátový přenos rostou s přibývajícím potřebou jednotlivců i celé společnosti lepšího, rychlejšího a kvalitnějšího pokrytí signálem i v těch nejdlejších lokalitách. Proto i vývoj v oblasti Wi-Fi přenosů jde velice rychle kupředu.

Cílem bakalářské práce je seznámení se se standardy 802.11n a 802.11ac, porovnání těchto dvou standardů se staršími standardy a prezentovat hlavní rozdíly a inovace. Na základě těchto rozdílů a inovací je úkolem navrhnout laboratorní úlohu pro studenty bakalářského studia a také tyto rozdíly demonstrovat pomocí jednoduché aplikace, naprogramované v prostředí MATLAB. Laboratorní úloha je navrhována jako inovace současné laboratorní úlohy v předmětu BRMK, která je aktuálně orientovaná na měření přenosu pomocí Bluetooth a Wi-Fi, standardu IEEE 802.11g. Tento standard patří mezi vycházející standardy a již není tak hojně využíván. Studenti budou moci porovnat kmitočtové spektrum signálu Wi-Fi pro 20 MHz a 40 MHz šířku pásma, přenosové rychlosti u obou šířek pásma a u MIMO technologie závislost přenosové rychlosti na počtu antén.

První kapitola ve stručnosti seznamuje s pojmem Wi-Fi a historie Wi-Fi. Ve druhé kapitole jsou detailně popsány oba standardy 802.11n a 802.11ac, inovace a klíčové rozdíly v obou standardech. Třetí kapitola se věnuje návrhu aplikace, která by měla být použita ve výuce. Aplikace je zaměřena na odhad reálné přenosové rychlosti. Čtvrtá a poslední část práce je věnována laboratorní úloze. Je zde popsána analýza úlohy, sestavení včetně blokového schématu a naměřené hodnoty. Kompletní návrh laboratorní úlohy, obsahující zadání, návod k úloze a vypracovaný vzorový protokol je součástí práce jako příloha.

1 STANDARDY SÍTÍ WLAN

Bezdrátová komunikace je v dnešní době nedílnou součástí života. Ať už pro přenos dat mezi dvěma zařízeními, tak pro připojení jednotlivých účastníků do celosvětové internetové sítě. Samotné bezdrátové spojení je všeobecně označováno názvem Wi-Fi.

Název Wi-Fi (Wireless Fidelity) byl vytvořen společností WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) jako obchodní značka společnosti.



Obrázek 1-1 Oficiální logo Wi-Fi, převzato z [1]

1.1 Historie Wi-Fi

Mezi lety 1960 a 1980 se technologie rádiového přenosu dat využívala pouze pro vojenské účely, pro civilní použití byla uvolněna na začátku 80. let [1].

V únoru, roku 1980, profesní organizace IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) založila novou rodinu standardu 802 pro lokální a metropolitní sítě. Jednotlivé standardy jsou označovány 802.x (802.3 – drátové sítě LAN, 802.11 bezdrátové sítě) [1].

První známý standard, dnes označovaný jako 802.11-1997, byl vydán právě v roce 1997. Rádiový přenos probíhal v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz, ale také mohl využívat infračerveného záření. Maximální přenosová rychlost byla 2Mb/s. Standard pracuje s modulací DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) a maximální využitá šířka pásma je 20 MHz.

V roce 1999 IEEE vydal dva standardy, označené jako 802.11b a 802.11a. Datový přenos u standardu IEEE 802.11b probíhá opět v pásmu 2,4 GHz a teoretická maximální přenosová rychlost činí 11Mb/s. Reálnou přenosovou rychlost ovlivňuje několik faktorů, takže ne vždy je dosaženo rychlosti maximální. Standard IEEE 802.11b využívá modulaci DSSS. U standardu 802.11a probíhá přenos v pásmu 5 GHz nebo v pásmu 3,7 GHz a teoretická maximální rychlost je udávána 54 Mb/s. Poprvé je u standardu IEEE 802.11a zavedena modulace OFDM. Oba standardy pracují s maximální šířkou pásma 20 MHz.

Další standard, vydaný roku 2003 pod označením IEEE 802.11g, přinesl změnu v podobě rychlosti přenosu 54 Mb/s i v pásmu 2,4 GHz. Stejně jako u standardů předchozích je maximální šířka pásma 20 MHz. Standard IEEE 802.11g využívá modulaci OFDM a DSSS. [1]

1.2 Současnost

Od roku 2009 je zaveden standard 802.11n, kde je podporováno jak kmitočtové spektrum 2,4 GHz, tak 5 GHz [1]. Díky možnosti rozšíření šířky pásma až na 40 MHz a nově zavedené technologii MIMO (Multiple Input – Multiple Output) je dosaženo maximální teoretické přenosové rychlosti až 600 Mb/s. Standard 802.11n pracuje pouze s modulací OFDM. Teoretická dosažitelná vzdálenost je ve vnitřním prostředí udávána 70 metrů, ve venkovním prostředí je to až 250 metrů.

V roce 2013 byl vydán standard 802.11ac, kde odpadá použití v kmitočtovém spektru 2,4 GHz, zato teoretická maximální přenosová rychlost dosahuje až 1331 Mb/s. Standard rovněž pracuje s modulací OFDM, teoreticky dokáže pracovat až s 8 prostorovými streamy a šířkou pásma až 160 MHz. [2]

Mezi nejnovější standardy rodiny 802.11 patří standard IEEE 802.11ad, který je definován pro kmitočtové pásmo 60 GHz. Jeho dosažitelnost je pouze několik metrů (cca 10), zato přenosová rychlost dosáhne rychlosti až 7 Gbit/s [3]

Dalším z očekávaných nových standardů je IEEE 802.11af, který v nevyužitém kmitočtovém pásmu po analogovém televizním signálu (0,47 – 0,71 GHz) předpokládá dosažení přenosové rychlosti až 568 Mbps do vzdálenosti 6 km.

Ve vývoji je standard IEEE 802.11ah. Tento standard se navrhuje pro kmitočtové pásmo 0,9 GHz a očekávaná přenosová rychlost je 40 Mbit/s.

Standard IEEE 802.11ax, který je očekáván až v roce 2019, má být revizí standardu IEEE 802.11ac. Očekává se zvýšení efektivity a dosažení přenosové rychlosti až 10 Gbit/s.

Dále bude v této bakalářské práci detailnější náhled na fyzickou vrstvu standardů IEEE 802.11n/ac



Obrázek 1-2 Logo Wi-Fi se všemi standardy – převzato z [4]

1.3 Fyzické vrstvy rodiny standardů IEEE 802.11

Nejstarší standardy rodiny standardů IEEE 802.11 mají základ postaven na třech fyzických vrstvách: IR (infráčervené záření) s rychlostí 1 Mbit/s a 2 Mbit/s, DSSS a FHSS. Po revizích standardu byly vrstvy doplněny o OFDM a HR/DSSS.

Systémy s rozprostřeným spektrem mají pro přenosovou techniku pozitivní vlastnosti: mají výbornou odolnost proti úzkopásmovému i širokopásmovému rušení, můžou se pohybovat pod úrovní šumu.

1.3.1 DSSS, HR/DSSS

DSSS je zkratka pro anglický název direct sequence spread spectrum. Základem této modulace je přímé rozprostírání signálu pseudonáhodnou sekvencí na šířku pásma 20 MHz. Modulace byla využívána u původního standardu 802.11, který definoval fyzickou vrstvu o rychlosti 2 Mbit/s. Novější standard IEEE 802.11b přinesl zrychlení až na 11 Mbit/s (HR/DSSS – High Rate / Direct Sequence Spread Spectrum). [8]

1.3.2 FHSS

Frequency hopping spread spectrum – podle pseudonáhodné sekvence se mění nosná vysílaného signálu. Šířka pásma rádiového kanálu bývá obvykle 1 MHz. Spektrum signálu je stejné jako u DSSS, ve skutečnosti je však v jeden okamžik aktivní pouze jedna nosná. Výhodou je větší odolnost proti rušení v pásmu 2,4 GHz. Tato metoda byla z novějších standardů vyřazena, je však využívána technologií Bluetooth. [8]

1.3.3 OFDM

Spektrum je rozděleno na velké množství úzkých kanálů, ve kterých se signál přenáší pomalu. Celkově je přenosová rychlost dána součtem rychlostí ve všech kanálech. Multiplex OFDM se využívá pro svou schopnost eliminace mezisymbolových interferencí. Metoda OFDM je využívána současnými standardy IEEE 802.11a/g/n/ac. [8]

2 MODERNÍ STANDARDY WLAN DLE IEEE 802.11N/AC

V současnosti nejrozšířenější pro bezdrátovou komunikaci jsou standardy IEEE 802.11n a IEEE 802.11ac. Oba standardy pracují s modulací OFDM. Díky možnosti rozšíření šířky kmitočtového pásma je dosaženo vyšších přenosových rychlostí. U standardu IEEE 802.11n lze využít šířku pásma až 40 MHz, u IEEE 802.11ac je to až 160 MHz. Jak standard IEEE 802.11n, tak IEEE 802.11ac zavedli přenosovou techniku MIMO, novější standard 802.11ac ještě tuto techniku rozšířil na MU-MIMO. IEEE 802.11n pracuje maximálně s modulací 64-QAM, kdežto 802.11ac dokáže využít modulaci 256-QAM. Standard 802.11n má určen teoretický dosah ve venkovním prostředí 250m a ve vnitřním 70 metrů. U 802.11ac je dosah poloviční.

Budování sítí s využitím bezdrátové technologie je výrazně levnější než sítí drátových nebo optických (kabelových i bezkabelových) a díky technologiím těchto standardů dosahují přenosové rychlosti hodnot srovnatelných se sítěmi drátovými.

2.1 IEEE 802.11n

Řešení komunikace v počítačových a telekomunikačních sítích lze popsat pomocí modelu ISO/OSI (obrázek 2-1), který systém rozděluje na sedm vrstev. Fyzická vrstva (L1) specifikuje fyzickou komunikaci a mezi hlavní funkce poskytované touto vrstvou patří navazování a ukončování spojení, modulace a má podíl na efektivním rozložení všech zdrojů mezi jednotlivé uživatele. Linková vrstva (L2) data z fyzické vrstvy uspořádává do logických celků (rámců), seřazuje přenášené rámce a fyzickým rámcům přiřazuje fyzické adresy. Jako příklad je možné uvést protokol IEEE 802.3 (Ethernet), který v modelu ISO/OSI realizuje vrstvu L1 a L2. Síťová vrstva (L3) – má na starosti směrování v síti a síťovou adresaci. Poskytuje spojení mezi systémy, které spolu přímo nesousedí a umožňuje komunikaci mezi technologicky rozdílnými sítěmi. Nejznámější protokol pracující v L3 je protokol IP. Transportní vrstva (L4) zajišťuje přenos dat mezi koncovými uzly (protokoly TCP a UDP). Relační vrstva (L5) - smyslem této vrstvy je organizovat a synchronizovat dialog mezi spolupracujícími relačními vrstvami obou systémů a řídit výměnu dat mezi nimi. Umožňuje vytvoření a ukončení relačního spojení, synchronizaci a obnovení spojení. Prezentační vrstva (L6) má za úkol transformovat data do takového tvaru, který používají aplikace, většinou pomocí různého šifrování, konvertování nebo komprimace. Aplikační vrstva (L7) slouží aplikacím pro přístup ke komunikačnímu systému a umožňuje jejich spolupráci (např. FTP, DNS, ...).

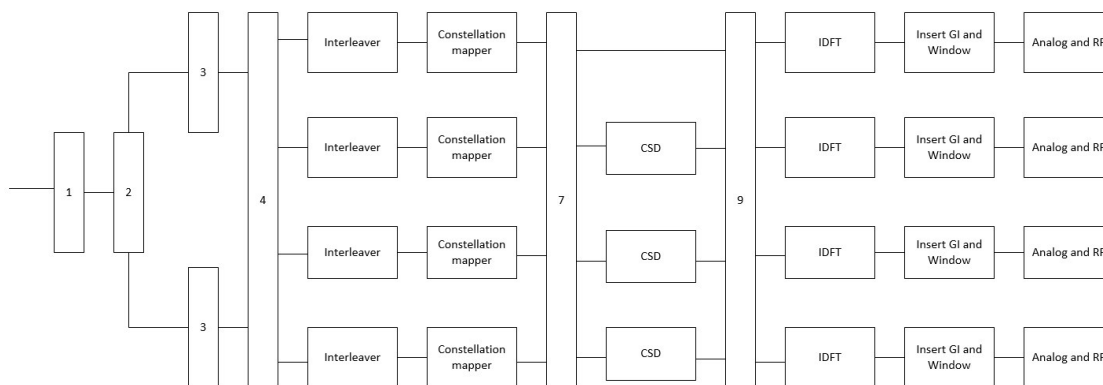
Ve standardu 802.11n je oproti starším standardům (a, b, g) zavedeno mnoho inovací, hlavně na úrovni L1 a L2 vrstvy. Nejvýznamnější změnou je použití tzv. MIMO technologie, dále možnost rozšíření šířky pásma až na 40 MHz a to jak pro spektrum 2,4GHz tak i pro 5 GHz spektrum. Maximální teoretická rychlost přenosu dat dosahuje až 600 Mb/s. Reálné rychlosti dosahují 75% rychlosti maximální (tj. 450 – 500 Mb/s), oproti staršímu standardu 802.11g, kde reálné rychlosti dosahují pouze 50% teoretické

maximální přenosové rychlosti. Změny nastaly také v šifrování přenosu dat. U standardu 802.11n již není podporováno šifrování TKIP ani WEP, i když výrobci u starších zařízení tuto možnost ponechali jako 802.11n-kompatibilní šifrování TKIP. Při volbě tohoto typu šifrování je však rychlost přenosu dat (tzv. data rate) limitována ke standardům 802.11a/b/g



Obrázek 2-1 Model ISO/OSI

2.1.1 Vysílač dle standardu IEEE 802.11n



Obrázek 2-2 Blokové schéma vysílače

Vstupní data jsou nejprve skramblována, stejně jako u 802.11a, pseudo-náhodným skramblerem délky 127 rámců (blok 1). Konvoluční kodér (blok 3) je také stejný jako u 802.11a s jediným rozdílem – pro 3 a 4 prostorové streamy jsou sudé a liché bity

kódovány odděleně dvěma různými kodéry. Oddělení je řízeno analyzátozem kodéru (blok 2). Tím dojde k dosažení maximální dekódovací rychlosti na straně přijímače.

Po kódování rozesílá streamový analyzátor (blok 4) bloky po sobě jdoucích bitů, velikosti $s = \max(N_{bpc}/2, 1)$ mezi různé prostorové streamy. N_{bpc} značí počet bitů na subnosnou. Blokovým prokladačem jsou poté bity prokládány bloky velikosti rovné počtu bitů v jednom OFDM symbolu n -tého prostorového streamu, $N_{CBPS,n}$. Prokládání bitů prostorových streamů a subnosných má za účinek zlepšení jak kmitočtové diverzity, tak diverzity prostorové. Prokladač prostorových streamů n v rámci bloku velikosti $N_{CBPS,n}$ bitů je definován následujícími vztahy:

$$k_n = 0, 1, \dots, N_{CBPS,n}-1 \quad (2.1)$$

$$s_n = \max\left(\frac{N_{BPSC,n}}{2, 1}\right) \quad (2.2)$$

$$i = \left(\frac{N_{CBPS,n}}{I_{DEPTH}}\right) (k_n \bmod I_{DEPTH}) + \text{floor}(k_n / I_{DEPTH}) \quad (2.3)$$

$$j = s_n \times \text{floor}\left(\frac{i}{s_n}\right) + (i + N_{CBPS,n} - \text{floor}(I_{DEPTH} \times \frac{i}{N_{CBPS,n}})) \bmod s_n \quad (2.4)$$

$$j_n = (j + N_{CBPS,n} - N_{BPSC,n} D_n) \bmod (N_{CBPS,n}) \quad (2.5)$$

Kde k_n je index vstupního bitu prostorového streamu n a j_n je index výstupního bitu. Hloubka prokladače I_{DEPTH} a rotace subnosné D_n jsou definovány v tabulce č. 1

Po prokládání jsou bity mapovány do QAM symbolů. Poté jsou prostorové streamy, závislé na cyklickém zpoždění (CD – cyclic delay), transformovány do kmitočtové oblasti. Následně je pro každou subnosnou použita matice prostorového mapování k převedení N_{ss} vstupů prostorových streamů na N_{tx} vysílacích výstupů. Jestliže je počet vysílaců shodný s počtem prostorových streamů, matice prostorového mapování může být jednotková. Pro přenos starších standardů 802.11a/g, které mají pouze jeden prostorový stream, se matice prostorového mapování zredukuje pouze na sloupce jedniček.

Po prostorovém mapování (blok 9) může vysílač přidat aditivní cyklické zpoždění, což následně umožňuje zajištění diverzity cyklického zpoždění (CDD – cyclic delay diversity) a zabráňuje nežádoucím účinkům beamformingu. Každý vysílač následně aplikuje inverzní rychlou Fourierovu transformaci (IFFT), vloží ochranný interval (guard interval) zesílí a vysílá signál [11][9] [16].

Tabulka 1 Parametry prokladače

N_{ss}	N_{SD}	I_{DEPTH}	D_0	D_1	D_2	D_3
1,2,3,4	52	13	0	22	11	33
1,2,3,4	108	18	0	58	29	87

2.1.2 MIMO technologie

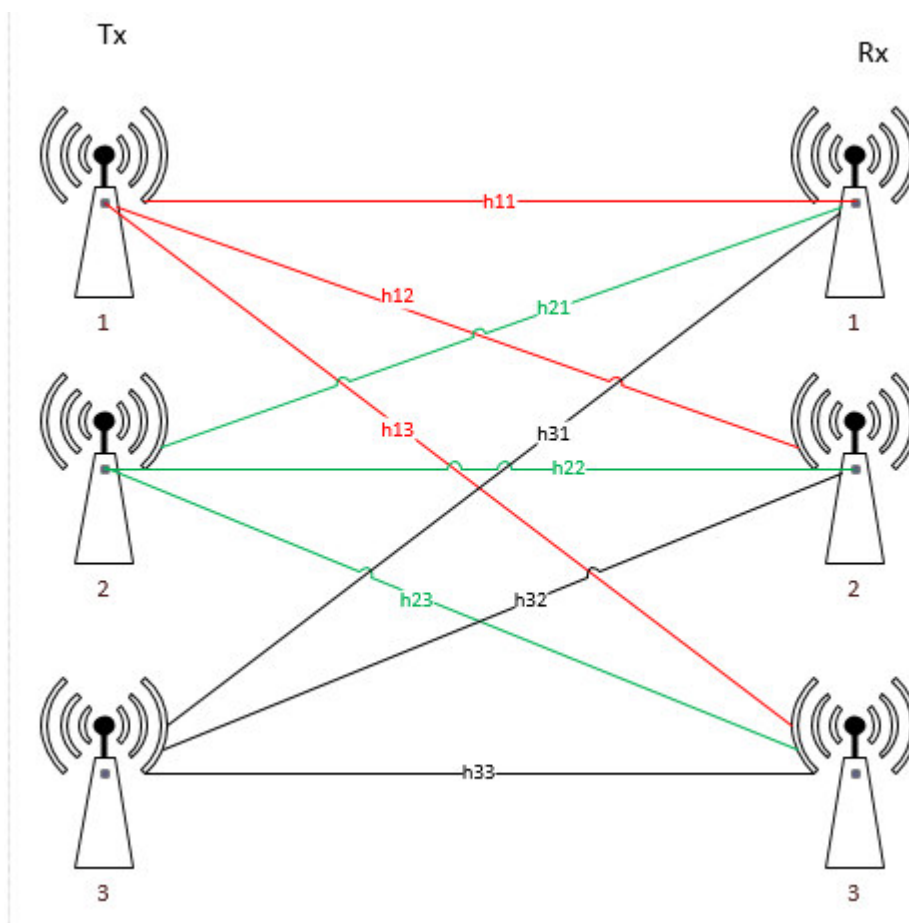
Dříve, než se začala používat technologie MIMO, všechny standardy 802.11 využívaly jednoho datového toku – vysílač měl jednu anténu a přijímač taktéž. Tato technologie je

označována jako SISO (Single Input – Single Output). Princip technologie MIMO spočívá ve využití více antén na vysílači i přijímači. (2x2, 3x3, 4x4). Mezi těmito anténami je možné vysílat a přijímat více datových toků současně, což vede ke zrychlení celého přenosu. Některá zařízení ze standardů 802.11a/b/g mají fyzicky zabudováno více antén. Taková zařízení využívají anténní diverzitu. Diverzita může být prostorová, časová nebo frekvenční. Jde o dva signály z různých cest (nebo v různém čase, nebo na různé frekvenci)[5]. Systém vyhodnotí, která anténa má lepší signál a tu poté fyzicky připojí k řídicí elektronice, takže vždy je využita pouze jedna anténa.

Vstupně-výstupní vztah v MIMO systémech s N_v vysílacími anténami a N_p přijímačskými lze matematicky popsat následovně:

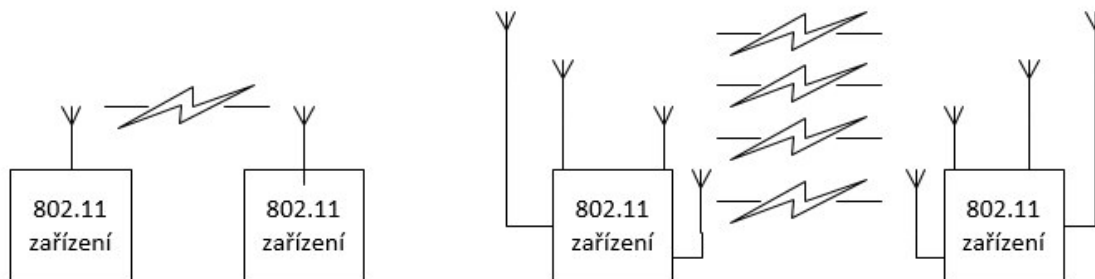
$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2.1)$$

kde \mathbf{x} je $N_s \times 1$ vektor vysílaných symbolů, \mathbf{y} je $N_p \times 1$ vektor přijímaných symbolů a \mathbf{n} je $N_p \times 1$ vektor přijímaného šumu; \mathbf{H} je $N_p \times N_v$ matice koeficientů kanálu a \mathbf{W} je $N_v \times N_s$ lineární předkódová matice. Vysílací symboly jsou tedy N_s -násobně prostorově vynásobené nad MIMO kanálem, jinými slovy, N_s proudů je vysíláno paralelně, což teoreticky vede k N_s -násobnému zvýšení prostorové efektivity. Lineární předkódování implikuje, že předkódová matice \mathbf{W} je použita k předkódování vektorů symbolů ke zvýšení výkonu. Sloupcová dimenze N_s matice \mathbf{W} může být zvolena menší než N_v , což je užitečné, pokud kanál nemůže přenášet N_s proudů [2].



Obrázek 2-3 Model využití kanálů u systému MIMO (3x3)

U MIMO technologie může být každá anténa ovládaná nezávisle na ostatních. Např. anténa č. 1 může vysílat (nebo přijímat) naprosto rozdílnou sadu bitů než anténa č. 2. V případě, že dvě antény přenášejí datové toky, které jsou na straně klienta nezávislé, dojde ke zdvojnásobení propustnosti.

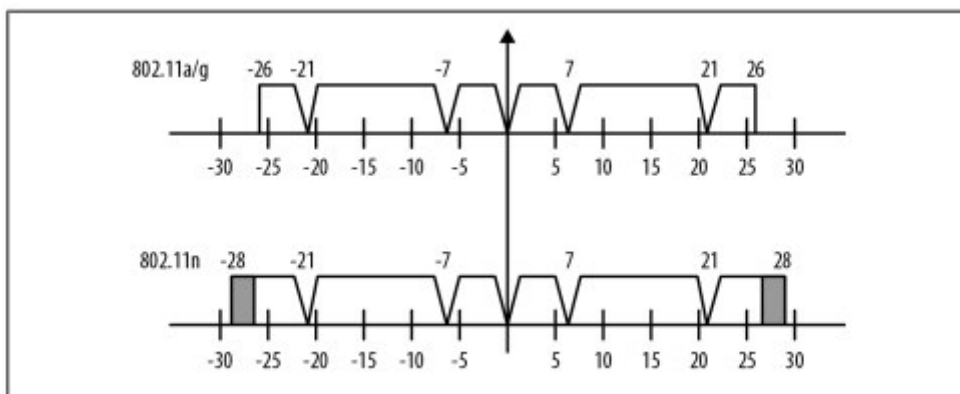


Obrázek 2-4 Srovnání mnohonásobného datového toku MIMO a SISO

Využívání mnohonásobného datového toku na stejné rádiové frekvenci je znázorněno na obrázku 2.1 v porovnání se SISO technologií. Jednotlivé streamy (datové toky) jsou označovány jako prostorové streamy (spatial streams). Jedná se o samostatné cesty prostorem mezi oběma body bezdrátové komunikace. Systémy MIMO využívají modulaci OFDM.

2.1.3 Šířka pásma

Systémy starších standardů 802.11a/b/g využívaly ve svém kmitočtovém spektru 52 nosných kmitočtů. Standard 802.11n vylepšil spektrální účinnost přidáním 4 subnosných. Srovnání struktury kanálů je znázorněno na obrázku 2.3. Toto zefektivnění přineslo nárůst propustnosti o 8% [3].



Obrázek 2-5 Srovnání struktury kanálů mezi 802.11a/g a 802.11n – převzato z [3]

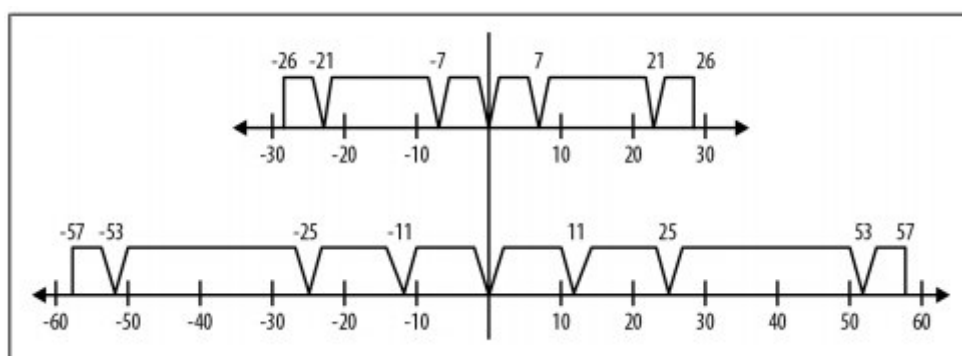
Doposud bylo využíváno šířky pásma 20 MHz (odstup mezi středními kmitočty jednotlivých subnosných). Technologie standardu 802.11n zavádí rozšíření této šířky pásma až na 40 MHz. Ačkoliv tato norma popisuje několik způsobů provozu 40 MHz šířky pásma, zdaleka nejběžnější z nich je, že dva sousedící 20 MHz kanály jsou sloučeny do jednoho souvislého 40 MHz bloku. I přesto, že střední kmitočet 40 MHz kanálu se posunuje výše, jeho název v zařízeních se nemění. Příklad: 20 MHz kanál pracující na

kanálu 60 může být použit vedle 20 MHz kanálu pracujícím na kanálu 64, AP (access point – přístupový bod) pracující se 40 MHz šířkou kanálu, vysílající na kanálu 60 zabírá spektrum kanálu 60 i kanálu 64 [3].

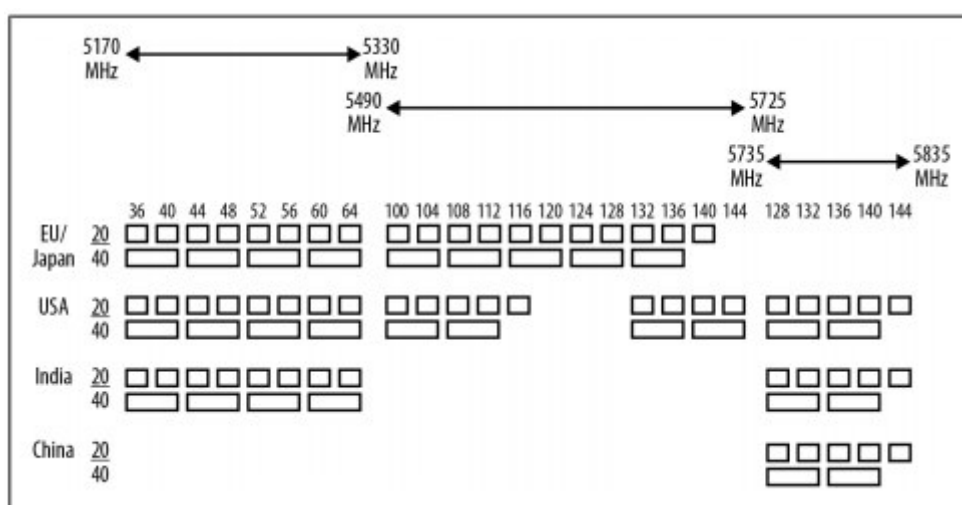
20 MHz mód využívá 56 subnosných pro vysokou propustnost (HT), což je o 4 více než u standardu 802.11a, ale pro datový přenos je využitelných pouze 52 subnosných. Při 40 MHz šířce pásma je počet subnosných celkem 114, pro datový přenos je jich využitelných 108.

Tabulka 2 Počet subnosných dle standardu a šířky pásma

Standard	Subnosné (celkem, využitelné pro data)
802.11a/g	52, 48
802.11n – 20 MHz	56, 52
802.11n – 40 MHz	114, 108



Obrázek 2-6 Rozdíl mezi 20 MHz šířkou pásma a 40 MHz šířkou pásma – převzato z [3]



Obrázek 2-7 Mapa dostupných kanálů v kmitočtovém pásmu 5 GHz – převzato z [3]

2.1.4 Kapacita kanálu

Jedním z důležitých parametrů bezdrátového přenosu obecně je kapacita kanálu. Pomocí Shannon – Hartleyova vzorce lze vypočítat maximální teoretickou kapacitu kanálu.

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (2.6)$$

C je maximální teoretická kapacita kanálu (bit/s), závisí na šířce pásma B (Hz) a poměru signál – šum S (W) / N (W). U standardu IEEE 802.11n takto dokážeme spočítat ideální přenosovou kapacitu kanálu. Pro výpočet reálné kapacity je třeba uvážit ztráty frekvenční a ztráty časové. Standard využívá 52 datových subnosných, 4 pilotní subnosné a 1 DC složku. Celkem tedy dostáváme 57 subnosných pro jeden OFDM symbol. Při vzdálenosti jednotlivých subnosných 312,5 kHz mezi sebou je tedy celková užitná šířka pásma rovna $57 * 312,5 \text{ kHz} = 17,8125 \text{ MHz}$. Účinnost systému ve frekvenční oblasti lze vyjádřit: $\mu_1 = \frac{17,8125}{20} = 0,89$

Pro výpočet ztrát, resp. účinnosti časové vyjdeme ze znalosti trvání OFDM symbolu, která je rovna 4 μs . Doba ochranného intervalu je 0,8 μs , pak trvání DFT/IDFT periody je 3,2 μs . Z těchto znalostí odvodíme účinnost $\mu_2 = \frac{3,2}{4} = 0,8$. Celková reálná kapacita systému 802.11n při šířce pásma 20 MHz je tedy rovna:

$$C_{real} = C * \mu_1 * \mu_2 \quad (2.7)$$

Dalším ovlivňujícím faktorem pro výslednou reálnou přenosovou rychlost jsou ztráty, které jsou již definovány standardem, a není možné je eliminovat. Při zpracování signálů dochází ke snížení přenosové rychlosti také při zdrojovém a kanálovém kódování. Při zdrojovém kódování dochází k redukci redundantních (nadbytečných) a irrelevantních (zbytečných) dat, což má za následek snížení šířky pásma přenosového kanálu. Proces zdrojového kódování je nutný hlavně u zpracování hovorových a obrazových signálů. U digitálních signálů je však tento proces zbytečný, protože redundance a irrelevance jsou již minimalizovány. Kanálové kódování záměrně zvyšuje redundanci (např. zvýšením počtu kontrolních bitů) a tím i mírně zvyšuje přenosovou rychlost i šířku pásma kanálu, při výrazném snížení chybovosti BER (Bit Error Rate) [8]. Ke snížení celkové kapacity systému přispívají režie na jednotlivých vrstvách, hlavičky (headers) apod.

Většina zařízení standardu 802.11n je schopna hodnotu S/N zobrazit na základě vyhledání dostupných sítí v okolí, případně v informaci o stavu aktuálního připojení. Tyto hodnoty jsou udávány v (dBm)

Site Survey							
Scanned Frequencies:							
5.18GHz 5.185GHz 5.19GHz 5.195GHz 5.2GHz 5.205GHz 5.21GHz 5.215GHz 5.22GHz 5.225GHz 5.23GHz 5.235GHz 5.24GHz 5.26GHz 5.265GHz 5.27GHz 5.275GHz 5.28GHz 5.285GHz 5.29GHz 5.295GHz 5.3GHz 5.305GHz 5.31GHz 5.315GHz 5.32GHz 5.5GHz 5.505GHz 5.51GHz 5.515GHz 5.52GHz 5.525GHz 5.53GHz 5.535GHz 5.54GHz 5.545GHz 5.55GHz 5.555GHz 5.56GHz 5.565GHz 5.57GHz 5.575GHz 5.58GHz 5.585GHz 5.59GHz 5.595GHz 5.6GHz 5.605GHz 5.61GHz 5.615GHz 5.62GHz 5.625GHz 5.63GHz 5.635GHz 5.64GHz 5.645GHz 5.65GHz 5.655GHz 5.66GHz 5.665GHz 5.67GHz 5.675GHz 5.68GHz 5.685GHz 5.69GHz 5.695GHz 5.7GHz 5.745GHz 5.75GHz 5.755GHz 5.76GHz 5.765GHz 5.77GHz 5.775GHz 5.78GHz 5.785GHz 5.79GHz 5.795GHz 5.8GHz 5.805GHz 5.81GHz 5.815GHz 5.82GHz 5.825GHz							
MAC Address	SSID	Device Name	Radio Mode	Encryption	Signal / Noise, dBm	Frequency, GHz / Channel	
4C:5E:0C:10:73:A3	kd_5G_2	4C5E0C1073A3	802.11a	WEP	-66 / -95	5.18 / 36	
D6:CA:6D:14:83:58	kd_5G_1	4C5E0C1073A3	802.11a	WPA2	-65 / -95	5.18 / 36	
04:18:D6:36:A0:2D	BARAK-vladik	Rocket M5	802.11n	NONE	-68 / -94	5.22 / 44	
00:15:6D:E4:C8:DA	M_TOPNET89B	UBNT	802.11n	WPA	-88 / -94	5.22 / 44	
D4:CA:6D:14:83:58	kd_5G	D4CA6D148358	802.11a	WEP	-74 / -92	5.32 / 64	
D6:CA:6D:14:83:59	kd_5G_3	D4CA6D148358	802.11a	WPA2	-75 / -92	5.32 / 64	
00:27:22:46:A1:EF	TOPNET103B	UBNT	802.11n	WPA	-64 / -90	5.5 / 100	
00:15:6D:C3:16:D7	5g_doubravice_sec	=5g_doubravice_s	802.11a	WPA	-77 / -90	5.52 / 104	
02:A0:DD:43:2A:3B	5g_doubravice_sec WPAAES	=5g_doubravice_s	802.11a	WPA	-76 / -90	5.52 / 104	
00:27:22:4C:BA:43	TOPNET103A	UBNT	802.11n	WPA	-75 / -90	5.54 / 108	
00:27:22:46:A1:E3	TOPNET89	UBNT	802.11n	WPA	-89 / -91	5.56 / 112	
00:15:6D:C1:2E:83	doub_5G	=doub_5G=	802.11a	WEP	-76 / -91	5.6 / 120	

Obrázek 2-8 Ukázka výpisu dostupných bezdrátových sítí ze zařízení Rocket M5

Pro bezdrátovou síť TOPNET103B z obrázku 2-8 činí, dle Shannon – Hartleyova vzorce (2.6), teoretická kapacita kanálu pro šířku pásma 20 MHz je rovna

$$C_{(20 \text{ MHz})} = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 20 * 10^6 * \log_2 \left(1 + \frac{10^{\left(\frac{-64}{10}\right)}}{10^{\left(\frac{-90}{10}\right)}} \right) = 172,8 \text{ Mbit/s}$$

a pro šířku pásma 40 MHz je to dvojnásobek, tedy

$$C_{(40 \text{ MHz})} = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 40 * 10^6 * \log_2 \left(1 + \frac{10^{\left(\frac{-64}{10}\right)}}{10^{\left(\frac{-90}{10}\right)}} \right) = 345,6 \text{ Mbit/s}.$$

Při započítání ztrát μ_1 a μ_2 dostáváme pro 20 MHz šířky pásma kapacitu kanálu $C_{x(20 \text{ MHz})} = C_{(20 \text{ MHz})} * \mu_1 * \mu_2 = 172,8 * 10^6 * 0,89 * 0,8 = 123,03 \text{ Mbit/s}$. Ztráta vlivem definice standardu je tedy necelých 50 Mbit/s. Při šířce pásma 40 MHz potom kapacita kanálu C_x je rovna $C_{x(40 \text{ MHz})} = C_{(40 \text{ MHz})} * \mu_1 * \mu_2 = 345,6 * 10^6 * 0,89 * 0,8 = 246,07 \text{ Mbit/s}$. Kapacita kanálu pro šířku pásma 40 MHz je opět dvojnásobná, ale dvojnásobné jsou také ztráty (cca 100 Mbit/s).

Reálná hodnota je ovšem nižší. Příčin může být hned několik. Jedním z ovlivňujících faktorů je vhodná volba antény. Před uvedením do provozu je nutné znát podmínky, v jakých bude systém pracovat. V případě přímého spojení dvou bodů je vhodné použít antény směrové. Pokud se jedná o AP pro připojení více stanic v různých směrech a vzdálenostech, je třeba užít anténu všesměrovou nebo sektorovou. Vliv na kvalitu přenosu má hlavně návrh zářiče antény a technologické zpracování antény jako celku (rychlost a kvalita řídicí logiky, materiál zářiče, materiál reflektoru, apod.). Antény, které jsou vyrobeny z méně kvalitních, tím pádem levnějších, materiálů mohou být náchylnější na okolní rušení.

V neposlední řadě maximální přenosovou rychlost ovlivňuje počet připojených klientů k AP – čím více klientů je připojeno, tím nižší je přenosová rychlost [6], princip přístup klientů k AP bude zmíněn v kapitole 2.1.6.

Poslední dva, výše uvedené, faktory však nemají vliv na teoretickou kapacitu kanálu.

2.1.5 MCS schémata

MCS (Modulation and Coding Set) je hodnota, která popisuje počet prostorových streamů, modulaci (BPSK, QPSK, 16-QAM, nebo 64-QAM) a kód opravy chyb. Standard 802.11n definuje 77 různých kombinací modulace a kódování. Většina zařízení však podporuje pouze některá MCS schémata

Tabulka 3 Tabulka MCS indexů pro 1 prostorový stream

Index	Modulace	Kódový poměr	Rychlost připojení [Mbit/s]			
			20 MHz		40 MHz	
			800ns	400 ns	800 ns	400 ns
0	BPSK	1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	QPSK	1/2	13	14,4	27	30
2	QPSK	3/4	19,5	40,5	40,5	45
3	16-QAM	1/2	26	54	54	60
4	16-QAM	3/4	39	81	81	90
5	64-QAM	2/3	52	108	108	120
6	64-QAM	3/4	58,5	121,5	121,5	135
7	64-QAM	5/6	65	135	135	150

2.1.6 Mnohonásobný přístup v síti

Základním médiem přenosového protokolu v sítích 802.11 je DCF (Distributed Coordination Function). Jedná se o systém pro sdílení přenosového média více uživateli. DCF je založeno na metodě mnohonásobného přístupu s nasloucháním nosné a zabránění kolizím CSMA/CA (Carries Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Předcházením kolizí dojde v důsledku k zvýšení přenosového výkonu.

Chování stanice, využívající CSMA/CA, při vysílání datového rámce je (zjednodušeně) následující:

- 1) Přenosové médium je volné, stanice zahájí vysílání. V případě neúspěšného vysílání (nepotvrzený příjem protistranou) je zahájeno exponenciální čekání.
- 2) Médium je obsazeno, čeká se na uvolnění a stejně jako při neúspěšném vysílání je zahájeno exponenciální čekání.
- 3) Exponenciální čekání – stanice vybere náhodnou dobu z intervalu, jehož velikost se během opakovaných pokusů zdvojnásobuje. Po tuto dobu čeká a kontroluje, jestli nezačala vysílat jiná stanice. Pokud ano, opakuje krok 2. Je-li médium volné, odvysílá datový rámec.
- 4) Některé systémy podporují výměnu RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send). V tomto případě stanice vyšle RTS rámec, v případě přijetí CTS rámce zahájí

přenos.

Technologie s RTS/CTS rámci slouží k předcházení problému skrytého uzlu. Jedná se o takovou situaci, kdy k AP jsou připojena zařízení, která se vzájemně „nevidí“, protože nejsou fyzicky propojeny. Pokud by začala vysílat ve stejný okamžik, došlo by ke kolizi. Vysláním RTS rámce a přijetím CTS je zaručeno, že přenosové médium je volné k přenosu [17].

Dalším protokolem je CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect), kde stanice při vysílání kontroluje přenosové médium. Pokud stanice zjistí kolizi vysílání se svým, vysílání zastaví, čeká náhodnou dobu a opakuje pokus o vysílání. Tato metoda mnohonásobného přístupu je využívána u Ethernetových sítí.

2.1.7 Beamforming

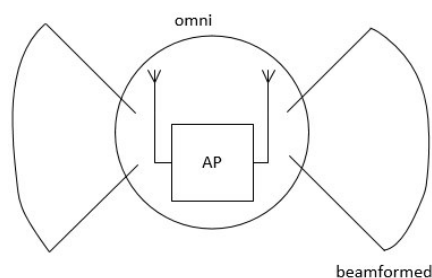
U běžných všesměrových antén je signál vysílán prakticky do všech směrů. Grafické znázornění tohoto vysílání vypadá jako kruh s vysílačem uprostřed. Potom signál, který je určen pro přijímač, je rozprostřen do všech směrů, i když je přijímač jen v jednom místě.

Beamforming (tvarování paprsku) dokáže soustředit energii pouze tím směrem, kterým se nachází připojený klient. Za použití stejné energie, ale se směřováním přímo na klienta, lze dosáhnout zlepšení kvality signálu, což vede opět k rychlejšímu přenosu.

Standard 802.11n definuje 4 metody beamformingu. Každá z nich určuje, které informace budou shromažďovány a které budou odeslány k vysílači.

- 1) *Úplný beamforming (Implicit Beamforming)* – vysílač předpokládá reciproký kanál a vytvoří řídicí matici. Výhodou je malé zatížení řídicího obvodu, nevýhodou je potřeba kalibrace vzdálenosti mezi AP a klientem.
- 2) *Otevřený, nezhuštěný beamforming (Non-compressed Explicit Beamforming)* – přijímač vypočítá řídicí matici a pošle ji k vysílači
- 3) *Otevřený, zhuštěný beamforming (Compressed Explicit Beamforming)* – přijímač rovněž vypočítá řídicí matici, před posláním k vysílači tuto informaci zhustí
- 4) *Otevřený beamforming s informací o stavu kanálu (Channel State Information Explicit Beamforming)* – informace o stavu kanálu je odeslána z přijímače k vysílači, který vygeneruje řídicí matici [7]

Při využití beamformingu se AP a klient musí předem „dohodnout“, kterou metodu budou využívat. Vzhledem ke složitosti výše uvedených metod většina výrobců tuto technologii do zařízení neimplementuje [3].



Obrázek 2-9 Znáznornění vysílání všesměrového (omni) a s využitím Beamformingu

2.1.8 OFDM modulace

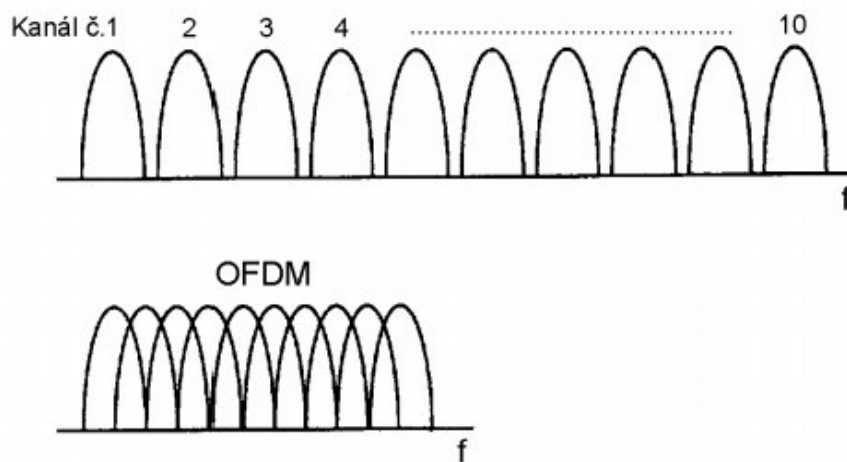
OFDM modulace je využívána nejen ve WLAN sítích, ale i v jiných rádiových systémech, např. v mobilních systémech a terestriálním digitálním televizním vysílání. Hlavním důvodem užití v těchto systémech je velice vysoká odolnost vůči odraženým signálům, které pak způsobují mezisymbolové interference – ISI (Inter Symbol Interference) a tím zvyšují i chybovost signálu BER. Mezi nevýhody OFDM modulace patří velký poměr špičkového a průměrného výkonu PAPR (Peak to Average Power Ratio) signálu. Vliv odražených signálů lze zmírnit zvětšením bitové periody signálu. To má za následek snížení přenosové rychlosti signálu. V OFDM modulaci je proto bitová perioda zvětšena a následně je sériový bitový tok rozdělen do velkého počtu paralelních cest a výsledná přenosová rychlost zůstane zachována.

V systémech s OFDM modulací musí být splněna podmínka ortogonalit : jednotlivé nosné (subnosné, tóny) jsou od sebe vzdáleny o celočíselný násobek převrácené hodnoty délky symbolového kmitočtu. Pro kmitočty jednotlivých nosných platí vztah:

$$f_k = f_0 + k \cdot \Delta f = f_0 + \frac{k}{T_S}, \quad k = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (2.8)$$

Výstupní signály z jednotlivých modulátorů jsou sečteny a výsledkem je OFDM signál v mezifrekvenčním pásmu. Tento signál je následně ve směšovači transponován do rádiového pásma na požadovanou hlavní nosnou s určeným kmitočtem, zesílen a vyzářen anténou do rádiového prostředí.

Je-li skupina subnosných ortogonální, nedochází k ovlivnění jednotlivých kanálů, i když se jejich spektra částečně překrývají. [8]



Obrázek 2-10 Spektrum signálu systému neortogonálního a ortogonálního – převzato z [8]

Modulace OFDM je využita ve standardech IEEE 802.11a/g a využívá 48 datových subnosných, mezi kterými je kmitočtový odstup 312,5 kHz. Ve standardu IEEE 802.11n při šířce pásma 20 MHz a HT Greenfield módu je definováno 52 užitečných subnosných.

Jelikož při přenosu rádiovým prostředím dochází k mnohacestnému šíření, v přijímači mohou vzniknout kromě ISI také vzájemné interference ICI (Inter Carrier Interference) mezi jednotlivými nosnými. To má za důsledek zvýšení chybovosti BER. Jako řešení je standardem definován ochranný časový interval GI (Guard Interval), který je do signálu vkládán na vysílací straně. Délka ochranného intervalu (T_{GI}) bývá nastavitelná, avšak interval T_{GI} by měl být větší než největší zpoždění odraženého signálu. Celková doba trvání symbolu se skládá ze součtu užitečné doby symbolu a doby trvání ochranného intervalu. V GI buď není přenášena žádná informace, nebo je do něj vloženo několik vzorků konce následujícího symbolu. Pak se jedná o tzv. cyklický prefix CP (Cyclic Prefix). V přijímači je GI odstraněn.

OFDM modulátor se realizuje pomocí signálového procesoru, využívajícího pro výpočet OFDM signálu rychlé inverzní Fourierovy transformace IFFT [8].

2.1.9 MIMO-OFDM

Od roku 1997, kdy byl vydán první standard IEEE 802.11, se maximální přenosová rychlost pohybovala v rozmezí 2 Mbit/s až 54 Mbit/s. Bohužel každé navýšení přenosové rychlosti mělo za následek snížení přenosové vzdálenosti. Ve standardech 802.11a/g je nejvyšší přenosové rychlosti 54 Mbit/s dosaženo využitím modulace 64QAM. Pro užití modulace vyššího řádu vyžaduje značně vyšší hodnotu SNR, než jednoduchá modulace BPSK, což má za následek snížení přenosové vzdálenosti.

Řešením, jak dosáhnout vyšší datovou propustnost a současně zvýšit dosah signálu, je MIMO-OFDM (Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Kombinace MIMO a OFDM je pro zvýšení přenosových rychlostí nejúčinnější. Některé systémy však kombinují technologii MIMO s TDMA (Time

Division Multiple Access) nebo s CDMA (Code Division Multiple Access). MIMO-OFDM dosahuje nejvyšší spektrální účinnost, proto poskytuje nejvyšší výkon a propustnost dat[1].

Základem standardu IEEE 802.11n je spojení tří hlavních prvků: užití MIMO-OFDM, 20 a 40 MHz šířka pásma a techniky agregace rámců. Při doporučené redukované délce ochranného intervalu 400 ns (GI – Guard Interval), místo původních 800 ns, dosahuje konfigurace pro 2 prostorové streamy, při šířce pásma 40 MHz, teoretické přenosové rychlosti až 300 Mbit/s. Nejvyšší přenosové rychlosti lze ve standardu dosáhnout v konfiguraci: 4 prostorové streamy, šířka pásma 40 MHz a ochranným intervalem 400 ns.

2.1.10 Kódování dat

Pro maximální využití kapacity MIMO systému je zapotřebí, aby vysílač i přijímač využívali prostorové kódování (SC), prostorové multiplexování (SM) a dokázali využívat formování vyzařovacího diagramu – beamforming. Použití beamformingu vede ke zlepšení kvality přijatého signálu, zvýšení přenosové rychlosti je dosaženo využitím SM a pro zvětšení rozsahu je využito Alamoutiho kódování – STBC (Space-Time Block Code).

STBC může být použito, pokud počet rádiových řetězců přesahuje počet prostorových streamů. Vysílač vyšle stejná data dvakrát, pokaždé přes jiný prostorový stream. Pokud přijímač nezachytí datový blok z jednoho streamu, má k dispozici tatáž data z druhého prostorového streamu.

V některých prostředích má využití STBC cenu 50% přenosové rychlosti. Pokud je STBC zapnuto, AP obsluhuje hlavně jednostreamová zařízení ve větších vzdálenostech, proto jeho použití je na zvážení v rámci návrhu sítě.[3]

Prostorové multiplexování, jak již bylo zmíněno, má za následek zvýšení přenosové rychlosti. Vysílač se zapnutým SM dokáže efektivně pracovat se všemi dostupnými prostorovými streamy tak, že je využije jako další „přidané“ kanály pro přenos dat. [3]

2.1.11 Frame Aggregation

Frame aggregation (rámcová agregace) je další novinkou u standardu 802.11n. Tato agregace zvyšuje propustnost pásma vysláním dvou nebo více datových rámců v jednom přenosu.

Každý rámeček (frame), přenášený systémem 802.11, má značné množství řídicích informací (záhlaví radiové úrovně, pole pro MAC (Media Access Control) frame, meziframové mezery a potvrzení přenesených framů). Při nejvyšší rychlosti přenosu tyto doplňující data spotřebují větší šířku pásma než samotný užitečný datový frame.

Pro řešení tohoto problému standard 802.11n definuje dva typy rámcové agregace: MSDU (MAC Service Data Unit) a MPDU (Unit MAC Protocol Data). Oba typy seskupují několik datových framů do jednoho velkého framu. Vzhledem k tomu, že řídicí informace se určují k jednomu framu, je poměr užitečného zatížení na celkový objem dat vyšší, což umožňuje vyšší datovou propustnost pásma[3][9].

2.1.12 PLCP módy

Specifikace standardu IEEE 802.11n definuje rámec fyzické vrstvy PLCP (Physical Layer Convergence Protocol). Tento protokol se skládá ze tří módů:

- 1) Non-HT mód (též někdy označován jako „legacy mode“) – tento mód by měla podporovat všechna zařízení standardu IEEE 802.11n. V tomto módu je zaručena kompatibilita se zařízeními starších standardů (IEEE 802.11a/b/g), nejsou však dostupné inovace standardu IEEE 802.11n
- 2) HT mixed mód – hlavičky (headers) PLCP jsou kompatibilní s hlavičkami standardů IEEE 802.11a/g, zbytek těla vysokorychlostního rámce nedokážou zařízení 802.11a/g dekodovat
- 3) HT Greenfield mód – PLCP hlavičky jsou mnohem kratší než u mixed módu a tento mód může být využit pouze mezi zařízeními standardu IEEE 802.11n

2.1.13 Datové pole

Všechny tři výše uvedené módy se liší v délce a počtu polí před datovým polem. To je u všech tří stejné. Před datovým polem se nachází například pole signálové, které obsahuje informace o MCS indexu, šířce pásma, délce PSDU, agregaci, STBC apod.

Datové pole u HT rámce se skládá ze čtyř bloků:

- 1) Servisní pole (16 bitů) – obsahuje 16 nul pro inicializaci skrambleru.
- 2) PSDU (proměnné délky) – obsahuje PLCP Service Data Unit, rámec vyšší protokolové vrstvy, příprava pro přenos rádiovým prostředím.
- 3) Tail bits (6 bitů pro každý kódovaný stream) – bity potřebné pro konvoluční kodéry.
- 4) Pad bits (proměnné délky) – zajišťují, že datové pole je složeno ze sudého počtu symbolů.

2.2 IEEE 802.11ac

Standard IEEE 802.11ac je zatím nejnovější standard rodiny 802.11, který k přenosu využívá kmitočtové pásmo 5 GHz. Pásmo 5 GHz není využíváno jinými systémy, jako pásmo 2,4 GHz, kde vysílá technologie Bluetooth, mikrovlnné trouby, bezšňůrové telefony a mnoho dalších systémů. Konceptně je 802.11ac postaveno na standardu 802.11n, ale již technologii standardu nelze využívat v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz. Největší novinkou standardu je implementace účinnější modulace 256QAM, která pro správný přenos vyžaduje čisté spektrum. Inovace nastává také v posunu šířky pásma až na 160 MHz a zavedení technologie MultiUser-MIMO (MU-MIMO). Oproti 802.11n, které dokáže pracovat maximálně se 4 prostorovými streamy, 802.11ac využívá až 8 prostorových streamů na straně AP, ale pouze 4 streamy na straně klienta.

Rozvoj technologie standardu IEEE 802.11ac lze rozdělit do několika vln, ve kterých jsou postupná vylepšení implementována ve veřejně dostupných produktech.

V první vlně mají AP typicky schopnost obsluhovat 3 streamy, ale při šířce pásma 80 MHz a využití modulaci 256QAM lze z původní rychlosti 450 Mbit/s dosáhnout přenosové rychlosti teoreticky až 1,3 Gbit/s.

Ve druhé vlně by zařízení měla být schopna pracovat s větší šířkou pásma a měla by být zavedena podpora MU-MIMO technologie.

Další vlny implementace mají v plánu navýšení počtu prostorových streamů a tak být úvodem do multi-gigabytové budoucnosti, jak slibuje charakter standardu 802.11ac [9]

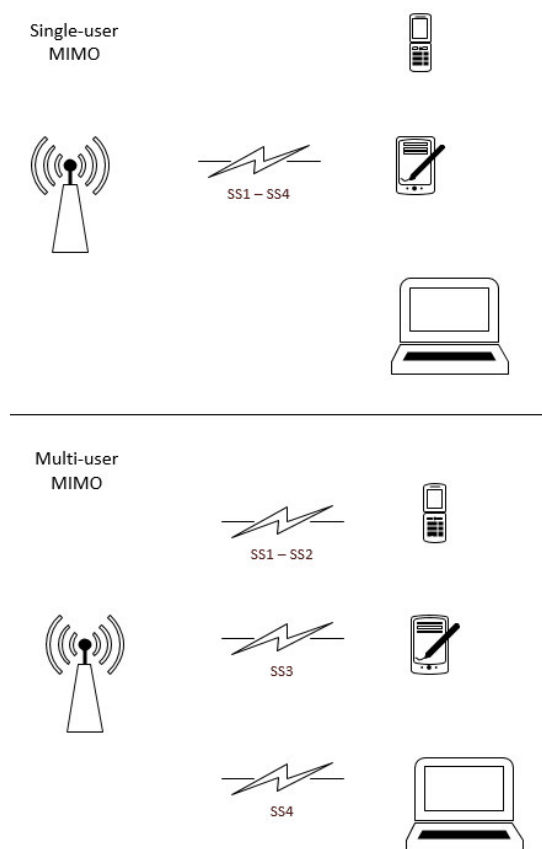
Tabulka 4 Předpoklad vývoje technologie 802.11ac

Vlastnost	První vlna	Druhá vlna
Maximální počet prostorových streamů	3	3 nebo 4
Šířka pásma	80 MHz	160 MHz
Maximální modulace	256QAM	256QAM
Teoretická maximální rychlost	1,3 Gbit/s	2,6 Gbit/s
Podpora beamformingu	Záleží na výrobcí	Ano
Podpora MU-MIMO	NE	MOŽNÁ

2.2.1 MU-MIMO

V technologii MU-MIMO je velký potenciál ke změně budování Wi-Fi sítí, protože umožňuje lepší využití prostoru, ve kterém se vysílá. MU-MIMO umožňuje řízení

prostorových streamů mezi AP a jednotlivými klienty. Příklad je uveden na obrázku 2.11, kde je znázorněn rozdíl mezi MIMO a MU-MIMO.



Obrázek 2-11 Rozdíl mezi Single-user MIMO a MU-MIMO

Všechny předešlé standardy 802.11 byly pouze Single-user, pouze ke zlepšení síly signálu bylo použito tvarování paprsku (Beamforming). U multi-user přenosu platí princip superpozice. Jsou-li dva přijímače od sebe v dostatečné vzdálenosti, může AP vysílat k oběma ve stejnou dobu.

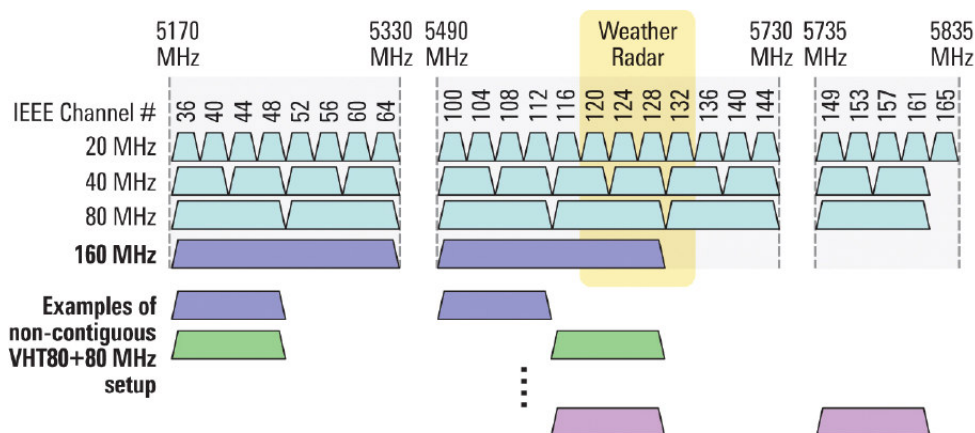
Při multi-user MIMO přenosu může každý přenos mít různý počet prostorových streamů, a také každý přenos může mít rozdílnou modulační rychlost a kódování. [9]

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, technologie MU-MIMO zatím není běžně využívána v komerčně dostupných zařízeních. Jedním z hlavních omezení MU-MIMO rychlostí je mezi-uživatelská interference, která je způsobená tím, že klienti (beamformee) jsou příliš blízko sebe, takže přenos k jednomu klientovi interferuje s přenosem k jinému klientovi.

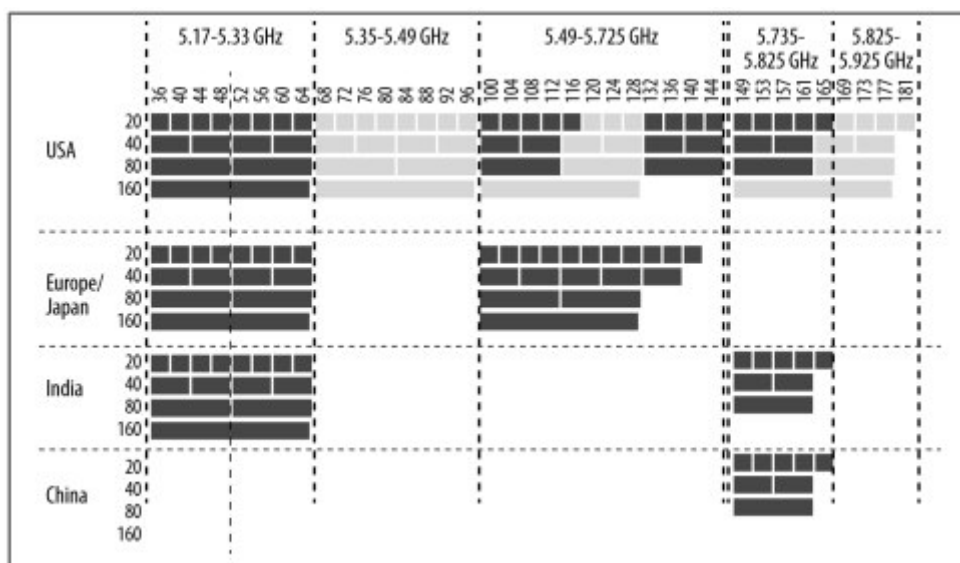
2.2.2 Šířka pásma

Standard 802.11ac nabízí využití šířky pásma 80 MHz, 160 MHz, nebo variantu 80+80 MHz. Maximální teoretická rychlost datového přenosu u standardu 802.11ac činí 6,93 Gb/s při využití šířky pásma 160 MHz a osmi prostorových streamů. Praktičtější maximální přenosová rychlost pro spotřebitelská zařízení by mohla být 1,56 Gb/s při

využití šířky pásma 80 MHz a čtyř prostorových streamů. Příklad rozložení šířky pásma 80+80 MHz je zobrazen na obrázku 2-11 spolu se všemi šířkami pásma.



Obrázek 2-12 Rozložení šířek pásma v kmitočtovém spektru 5 GHz - převzato z [9]



Obrázek 2-13 Rozložení dostupných vysílacích kanálů - převzato z [9]

V současné době komerčně dostupná zařízení spadají do první vlny vývoje, tudíž mají možnost pracovat s maximální šířkou pásma 80 MHz. [9]

2.2.3 Beamforming

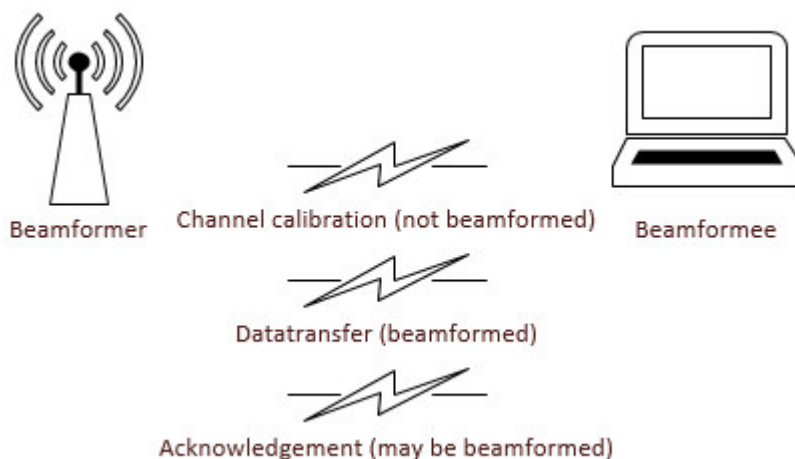
Podstatnou změnou oproti standardu 802.11n je rapidní zjednodušení této funkce. Jediná podporovaná metoda beamformingu je NDP (null data packet sounding – vyslání testovacího symbolu všem klientům a očekávání příchozích informací z měření přenosového kanálu).

Beamforming závisí na proceduře kalibrace přenosového kanálu, zvané sondování

kanálu (channel sounding). Na určení směru záření streamu má vliv mnoho faktorů. Při MIMO-OFDM kanálu mohou vznikat silné kmitočtově závislé odezvy vyžadující snížení přenosové rychlosti kanálem, případně může konkrétní frekvence odpovídat mnohem silněji na jednu přenosovou cestu než na ostatní. Beamforming umožňuje dosažení maximálního výkonu na obou stranách tím, že využije kanálů se silným výkonem a potlačí kanály se slabým výkonem. Matematicky je řídicí funkce obsažena v řídicí matici, což je v 802.11ac určeno písmenem Q. Maticové operace umožňují prostorovému mapovači upravit signál, aby byl přenášán pro každou OFDM subnosnou všemi cestami k vysílači, v jedné operaci. Samozřejmostí je, že po použití řídicí matice nezůstane anténní pole ve všesměrovém režimu.

Postup sondování kanálu je následující:

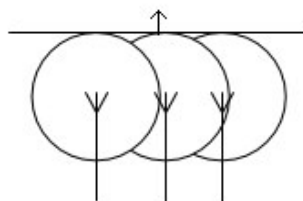
- 1) Beamformer začíná proces vysláním oznamovacího rámce (Null Data Packet Announcement), který je použit pro převzetí kontroly nad kanálem a identifikaci klienta beamformingu (beamformee). Tento klient odešle odezvu na rámec, ostatní klienti čekají na vstup do kanálu, než bude sondovací sekvence ukončena.
- 2) Beamformer zpracuje oznámení a zasílá paket bez dat (NDP – null data packet) Hodnotou tohoto paketu je informace, že přijímač může provést analýzu OFDM tréninkového pole pro výpočet odezvy kanálu a tím i řídicí matice.
- 3) Beamformee provede analýzu tréninkového pole v přijatém NDP a vypočítá zpětnovazební matici (ve specifikaci standardu 802.11ac je tato matice označena písmenem V), která poslouží beamformer straně pro výpočet řídicí matice.
- 4) Beamformer obdrží zpětnovazební matici a spočítá řídicí matici pro přenos ke klientovi.



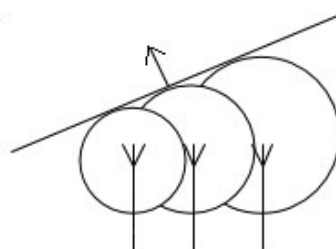
Obrázek 2-14 Terminologie beamformingu a jeho proces

Jakmile má vysílací jednotka k dispozici řídicí matici, může vysílat rámce zacílené do určitého směru, jak je znázorněno na obrázku. Pro vypočítaný směr je signál silnější, v ostatních směrech (s ohledem na výrobní provedení vysílací antény) je signál slabší. [9]

Bez řídicí
matice



S řídicí maticí



Obrázek 2-15 Využití více antén; a) řídicí matice není aplikována; b) s řídicí maticí



Power in all
directions is similar:
 $Q \cdot H = \text{similar value}$

Without
beamforming



Non-preferred direction: $Q \cdot H = \text{„small“}$



Preferred direction: $Q \cdot H = \text{„large“}$



Non-preferred direction: $Q \cdot H = \text{„small“}$

With beamforming

Obrázek 2-16 Efekt řídicí matice

Multi-user beamforming se v praxi ještě nevyužívá, protože tato technologie je daleko více časově náročná než u single-user. Aby vysílač jako tvarovač signálu (beamformer) mohl paprsek správně zaměřit, potřebuje neustále aktuální informace o přenosovém kanálu pro každého klienta. Měření přenosového kanálu u multi-user beamformingu proto probíhá velmi rychle v krátkých časových intervalech[9].

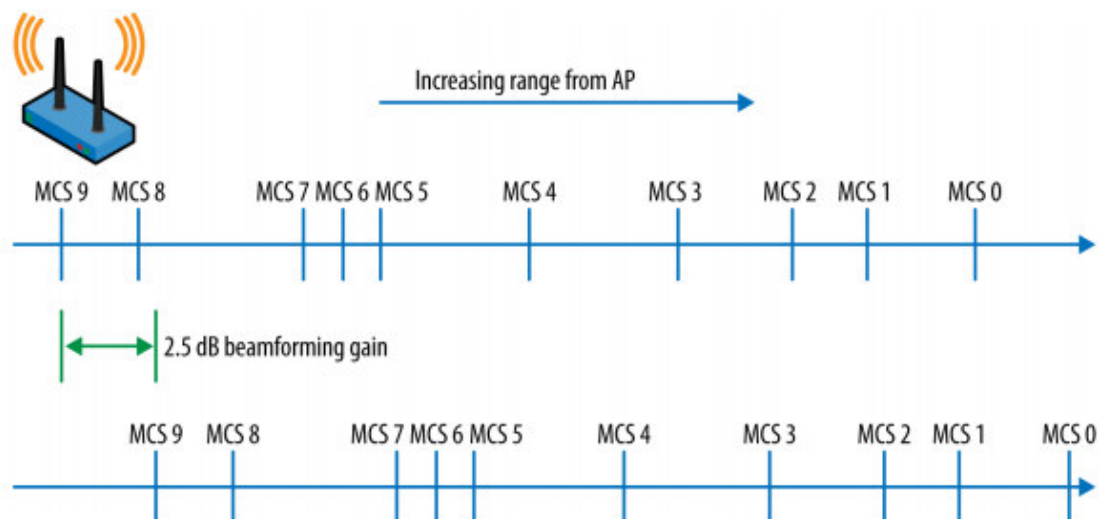
2.2.4 MCS schémata

U standardu 802.11ac je definováno pouze 10 MCS schémat. Zjednodušení vyplynulo z vynechání počtu streamů z jednotlivých MCS framů. Novinkou u 802.11ac je zavedení modulace 256-QAM

Tabulka 5 Hodnoty MCS pro standard IEEE 802.11ac

MCS index	Modulace	Kódovací poměr (R)
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

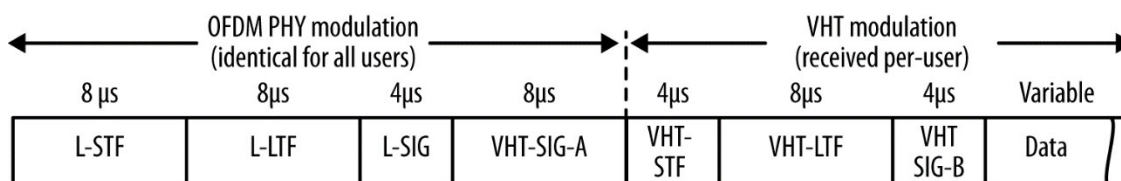
Při využití beamformingu se podstatně zlepší dosah signálu. Rozdíl v dostupnosti v závislosti na vzdálenosti je znázorněn na obrázku 2-17.



Obrázek 2-17 Vliv beamformingu na dosah signálu - převzato z [9]

2.2.5 VHT rámec

VHT (very high throughput) je další novinkou standardu 802.11ac. Obsahuje mimo jiné také signálové pole (stejně jako u standardu IEEE 802.11n).



Obrázek 2-18 Rozložení VHT rámce - převzato z [9]

Na obrázku 2.14 je znázorněno rozložení polí ve VHT rámci. L-STF (Non-HT Short Training Field) a L-LTF (Non-HT Long Training Field) sestávají ze 12 OFDM symbolů (stejně jako u 802.11a), které pomáhají přijímači identifikovat začátek rámce, synchronizovat časovače a výběr antény. Jakékoliv zařízení, které využívá OFDM dokáže tato pole dekodovat.

L-SIG (Non-HT Signal Field) – obsahuje datovou rychlost a délku rámce potřebné k vypočítání doby trvání rámce.

VHT-SIG-A (VHT Signal A) a VHT-SIG-B (VHT Signal B) – VHT signalizace je rozdělena do dvou polí. Obsahují informace o šířce kanálu, modulaci, kódování, a jestli je rámec single nebo multi-user. Tyto informace dokáže dekodovat pouze zařízení standardu 802.11ac

VHT-STF (VHT Short Training Field) – Nese informaci o signálu. Pomáhá přijímači nastavit zesílení a rozlišit opakující se vyzařovací diagram.

VHT-LTF (VHT Long Training Field) – sestává ze sady symbolů, které řídí demodulaci zbytku rámců. Podle počtu přenášených streamů je tvořen 1, 2, 4, 6 nebo 8 symboly (linka s přenosem 5 streamů vyžaduje 6 symbolů). Obsah tohoto pole je také využíván pro odhad kanálu, na čemž je závislý beamforming.

Datové pole (Data Field) – Obsahe datového pole jsou pakety vyšší vrstvy protokolu, případně agregovaný rámec obsahující mnohonásobné pakety vyšší vrstvy protokolu. Není-li ve fyzické vrstvě přítomno užitečné zatížení datového pole, jde o NDP, které nastavení, měření a ladění beamformingu u VHT [9].

2.3 Hlavní rozdíly mezi standardy

Nejdůležitějším rozdílem mezi standardy je maximální přenosová rychlost. Vyšší maximální přenosové rychlosti je postupným vývojem dosahováno rozšiřováním šířky pásma jednotlivých kanálů, zavedením technologií MIMO a MU-MIMO apod. Modernizací prošlo také šifrování přenosu. Od standardu 802.11n již není podporováno šifrování TKIP. Standard 802.11ac již nepodporuje ani šifrování WEP.

V kmitočtovém spektru 2,4 GHz pracují pouze standardy 802.11b/g/n. Standardy 802.11a a 802.11ac jsou pouze pro kmitočtové spektrum 5 GHz.

Šířka pásma vysílacího kanálu 20 MHz je základní šířkou pásma pro všechny standardy. U standardu 802.11n je možné využívat šířku pásma až 40 MHz a u standardu 802.11ac až 160 MHz

Zařízení obou nových standardů 802.11n a 802.11ac, která podporují technologii MIMO a MU-MIMO jsou zpětně kompatibilní s technologií SISO, avšak degraduje jak šířka pásma, tak maximální přenosová rychlost na úroveň standardu staršího.

Technologie MIMO dokáže pracovat s více než jedním prostorovým streamem. Standard 802.11n je definován pro maximální obsluhu 4 současných prostorových streamů a při maximální modulaci 64-QAM, kódovacím poměru 5/6 a šířce pásma 40 MHz lze teoreticky dosáhnout přenosové rychlosti až 600 Mbit/s. U standardu 802.11ac se předpokládá s možností obsluhy 8 současných prostorových streamů, kde podle nejvyššího MCS9 (256-QAM, 5/6, 160 MHz, GI = 400ns) je teoretická maximální přenosová rychlost udávaná 6933,3 Mbit/s

Tabulka 6 Rozdíl mezi maximálními přenosovými rychlostmi dle standardu

Standard	Kmitočtové spektrum [GHz]	Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	Modulace fyzické vrstvy
802.11b	2.4	11	DSSS
802.11g	2.4	54	OFDM
802.11a	5	54	OFDM
802.11n	5 i 2.4	600	MIMO OFDM
802.11ac	5	1300	MU-MIMO OFDM

Tabulka 7 Srovnání maximální přenosové rychlosti pro stejnou šířku pásma

Standard	Maximální přenosová rychlost pro šířku pásma 20 MHz [Mbit/s]	Maximální přenosová rychlost na 1 Hz šířky pásma [Mbit/s]
802.11b	11	0,55
802.11g	54	2,7
802.11a	54	2,7
802.11n	288,9	14,445
802.11ac	346,7	17,335

Tabulka 8 Porovnání maximální teoretické přenosové rychlosti v závislosti na standardu a šířce kmitočtového pásma

Standard	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
802.11b	11 Mbps	-	-	-
802.11a/g	54 Mbps	-	-	-
802.11n (1SS)	72 Mbps	150 Mbps		
802.11ac (1SS)	87 Mbps	200 Mbps	433 Mbps	867 Mbps
802.11n (2SS)	144 Mbps	300 Mbps		
802.11ac (2SS)	173 Mbps	400 Mbps	867 Mbps	1,7 Gbps
802.11n (3SS)	216 Mbps	450 Mbps		
802.11ac (3SS)	289 Mbps	600 Mbps	1,3 Gbps	2,3 Gbps
802.11n (4SS)	289 Mbps	600 Mbps		
802.11ac (4SS)	347 Mbps	800 Mbps	1,7 Gbps	3,5 Gbps
802.11ac (8SS)	693 Mbps	1,6 Gbps	3,4 Gbps	6,9 Gbps

Tabulka 9 Rozdíl v šířce pásma vysílacího kmitočtu dle standardu

Standard	Maximální šířka pásma [MHz]	Maximální využívaná modulace a stupeň kódování
802.11b	20	DSSS
802.11g	20	PBCC
802.11a	20	PBCC
802.11n	40	64-QAM (5/6)
802.11ac	160	256-QAM (5/6)

Tabulka 10 Podporovaná technologie u jednotlivých standardů

Standard	Podporovaná technologie
802.11b	SISO
802.11g	SISO
802.11a	SISO
802.11n	MIMO, SISO
802.11ac	MU-MIMO, MIMO, SISO

3 VÝUKOVÁ APLIKACE

Aplikace, která má za úkol demonstrovat rozdíly mezi standardy IEEE 802.11n a IEEE 802.11ac je programována v prostředí MATLAB. Cílem této aplikace je výpočet a zobrazení očekávané reálné přenosové rychlosti v závislosti na zvoleném standardu.

Aplikace slouží k porovnání teoretické a reálné přenosové rychlosti pro Wi-Fi standardy IEEE 802.11a/b/g/n/ac. Po zvolení standardu program umožňuje volbu šířky pásma. Pro každý standard je možno vybrat pouze šířku pásma, které je standardem definována. Dále, je-li to standardem povoleno, je možnost volby počtu MIMO kanálů. Tato volba je dostupná pouze u standardů IEEE 802.11n a IEEE 802.11ac. Stejně tak další možnost přepnutí délky GI. Pro každý standard je vypočítána modulační rychlost (vždy pro nejlepší možný stav), který se zobrazí v poli pod ListBoxem s volbou Guard Intervalu.

Po zvolení hodnot aplikace vypočítá kapacitu kanálu dle vzorce (2.6) a kapacitu kanálu s ohledem na omezení systému podle vzorce (2.7). K výpočtu předpokládané reálné přenosové rychlosti je možné zadat konkrétní úroveň signálu a úroveň šumu včetně interferencí. Hodnoty se zadávají v jednotkách [dBm]. Vždy po změně jakékoliv hodnoty aplikace dopočítá modulační rychlost, hodnotu SNR, kapacitu kanálu dle Shannon-Hartleyova vzorce, kapacitu kanálu s ohledem na omezení standardu, očekávanou přenosovou rychlost dat na úrovni TCP komunikace bez rámcové agregace a jako poslední je přenosová rychlost se započítanou agregací 1:5.

Pro výpočet časování paketového přenosu jsou v aplikaci definovány konstanty. Jsou to: doba rámce DIFS, doba rámce SIFS, doba přenosu hlavičky (preamble) a pro standard 802.11a a 802.11g ještě následné prodloužení (extension time), data jsou ze zdroje [14].

Pro jednoduchost výpočtů odhadovaných přenosových rychlostí je uvažováno po každých třech paketech datových jeden paket potvrzovací (ACK). Ve výpočtech není zahrnuta ztráta při detekci a opravách kolizí.

Program

Teoretical vs. real transmission speed

Choose IEEE standard	802.11n
Choose bandwidth	20
MIMO	1
Guard Interval	Long
Data modulation speed	65.0 MBit
Signal strenght [dBm]	-64
Noise and interference [dBm]	-90
SNR	26.0 dB
Channel capacity (by Shannon)	172.8 Mbps
Channel capacity (by System)	123.1 Mbps
TCP speed (without aggregation)	40.2 MBit
TCP transmission speed (with frame agregation)	54.8 MBit

Obrázek 3-1 Ukázka rozhraní programu

4 LABORATORNÍ ÚLOHA

Praktická část této práce zahrnuje návrh laboratorní úlohy, která demonstruje použití technologie MIMO. Celá úloha se orientuje pouze na standard IEEE 802.11n a hlavním cílem je ukázat závislost přenosové rychlosti systému MIMO 2x2 na postupném útlumu, tím pádem na snižování počtu antén v systému.

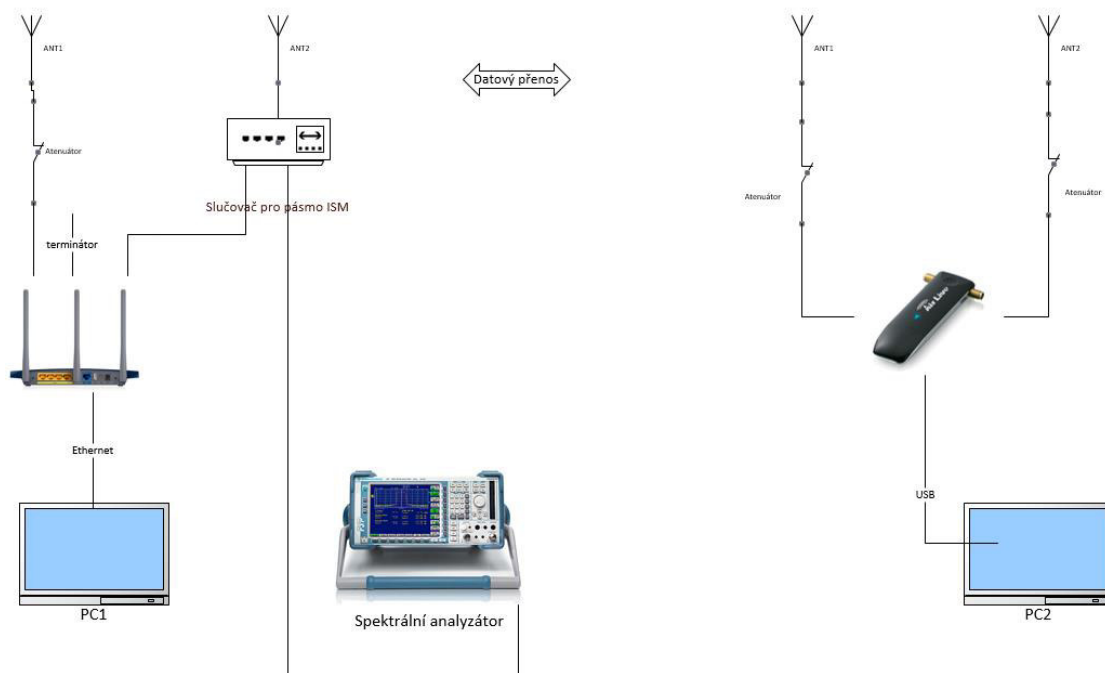
4.1 Analýza laboratorní úlohy

V první části měření se na spektrálním analyzátoru zobrazí kmitočtové spektrum vysílaného signálu pro pásmo ISM 2,4 GHz a to jak pro šířku pásma 20 MHz, tak pro šířku pásma 40 MHz. Takto zobrazená spektra se porovnají s teoretickými znalostmi o kmitočtovém spektru pro standard 802.11n.

Další část měření je zaměřena na ověření reálné přenosové rychlosti v závislosti na počtu vysílacích/přijímacích antén systému MIMO. Při šířce pásma 20 MHz se změří přenosová rychlost bez přidaného útlumu na anténách. Následně se pomocí atenuátoru bude postupně zvyšovat útlum na jedné anténě u AP a na obou anténách přijímače. Po každé změně útlumu se zkontroluje odezva vysílače, na PC s přijímačem se zkontroluje aktuální rychlost připojení (pro určení aktuálního MCS indexu) a provede test přenosové rychlosti při přenosu FTP. Rozdíl mezi rychlostí reálnou a teoretickou je třeba v závěru laboratorní úlohy okomentovat.

V poslední části měření se ověří vliv natočení, polohy a vzdálenosti antén vysílače a přijímače při utlumení na přenosovou rychlost.

4.1.1 Blokové schéma



Obrázek 4-1 Blokové schéma zapojení pracoviště

4.2 Sestavení laboratorní úlohy

Pro danou laboratorní úlohu bylo třeba zvolit vhodné AP i klienta tak, aby bylo možné zapojit vložený útlum před antény. Dalším požadavkem na aktivní prvky bylo, aby oba prvky byly konstruovány pro standard 802.11n. Oběma požadavkům vyhověl jako AP router TP-LINK TL-WR1043 ND, který disponuje třemi odnímatelnými anténami a jako client USB Wi-Fi adaptér Airlive X.USB-3 se dvěma anténami.

Připojení spektrálního analyzátoru, který v této úloze slouží k zobrazení kmitočtového spektra, je přes slučovač pro ISM pásmo. Tento slučovač umožňuje spojení až 3 zařízení. Pro potřeby našeho zapojení stačí pouze připojení signálu z routeru, spektrálního analyzátoru a zakončení anténou. Nevyužitý konektor byl zakončen terminátorem. Pomocí generátoru signálu byl určen útlum atenuátoru, který je roven 5 dB. Mezi jednotlivými vstupy je útlum 12dB.

Aby byl demonstrován systém MIMO 2x2, byla jedna ze tří antén na routeru zakončena terminátorem. Zvolena byla anténa prostřední, kvůli větší vzdálenosti mezi zbývajících dvěma anténami. Před jednu ze zbývajících dvou antén je pomocí koaxiálních kabelů předřazen atenuátor. K poslední anténě je pomocí, již zmiňovaného, slučovače připojen spektrální analyzátor. K routeru je pomocí ethernetového propojovacího kabelu připojen PC, na kterém běží FTP server. Jelikož spojení mezi routerem a PC je rychlostí 1 Gbit/s, lze zanedbat ztráty na tomto úseku. USB Wi-Fi adaptér je připojen do USB portu PC2 a oběma jeho anténám jsou předřazeny atenuátory.

Na PC1 se přes webový prohlížeč nastaví vysílací parametry routeru, jako název sítě

(SSID), vysílací kanál, šifrování, šířka kmitočtového pásma, IP adresa a další. K nastavené síti se připojí PC2 pomocí USB Wi-Fi adaptéru. Kontrola spojení se provede z libovolného PC pomocí příkazového řádku, zadáním příkazu ping a IP adresy druhého PC. Po kontrole správnosti spojení je možné zahájit samotné měření.

Spektrální analyzátor se nastaví podle návodu k laboratorní úloze. Po správném nastavení lze pozorovat kmitočtové spektrum – jak pro šířku pásma 20 MHz, tak po změně v nastavení routeru i pro šířku pásma 40 MHz. Oba průběhy kmitočtového spektra se uloží na FLASH disk, proto není nutné překreslovat ručně.

V další části měření je nejprve nutné překontrolovat všechny atenuátory, aby byly nastaveny nulové hodnoty útlumů. Pokud jsou všude nulové útlumy nastaveny, provede se přenos souboru větší velikosti (řádově desítky až stovky MB) pomocí FTP spojení mezi oběma počítači. Zaznamená se průměrná přenosová rychlost. Jelikož ani jeden z aktivních prvků nedokáže zobrazit sílu signálu na jednotlivých anténách a nepodařilo se nalézt žádný jednoduchý, bezplatný software, který by z chipsetu některého zařízení dokázal vyčíst a zobrazit aktuálně využitý MCS, určení MCS je možné pouze ze stavového výpisu vlastností Wi-Fi (součást MS Windows) na základě zobrazované rychlosti připojení a následného porovnání s tabulkou MCS indexů. Měření je opakováno vždy po postupném nastavení útlumu jednotlivých atenuátorů. Nejprve je navyšován útlum antény u vysílacího routeru. Atenuátor lze nastavit na maximálně 50 dB, proto je nastavení rozděleno do tří kroků. První a druhý krok je o velikosti 20 dB, třetí krok až do maximálních 50 dB, tedy o 10 dB. Po dosažení zmíněného maxima je nastavován jeden z atenuátorů, předřazených anténám u USB Wi-Fi adaptéru. Tyto atenuátory lze nastavit na maximální útlum 80 dB, proto je zvolen u první antény krok 20 dB. U poslední antény je třeba útlum měnit s menším krokem, protože je třeba co nejpřesněji najít bod, kdy dojde k odpojení od routeru. Proto je útlum zvyšován po 10 dB krocích.

Po celou dobu měření je vhodné sledovat také odezvu mezi oběma PC, aby bylo patrné, kdy dojde k rozpojení systému. Očekávané je postupné zvyšování latencí mezi PC s narůstajícím útlumem antén.



Obrázek 4-2 Zapojení AP spolu s PC1

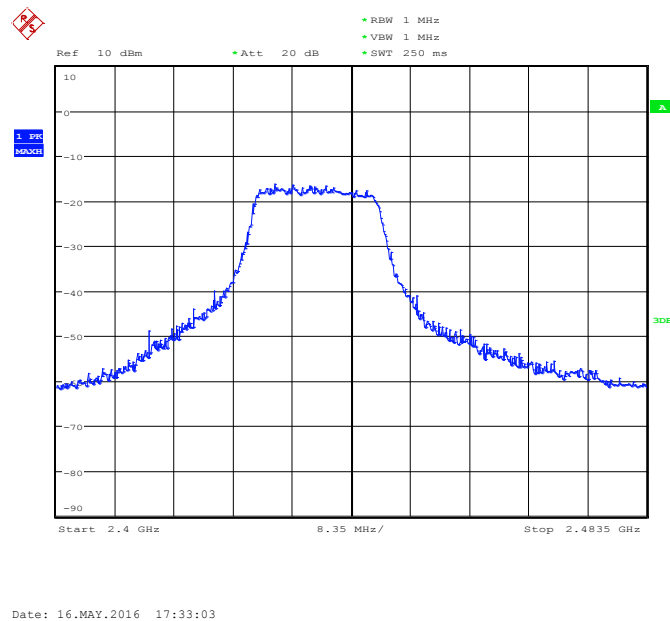


Obrázek 4-3 Zapojení PC2 s klientem a spektrálním analyzátozem

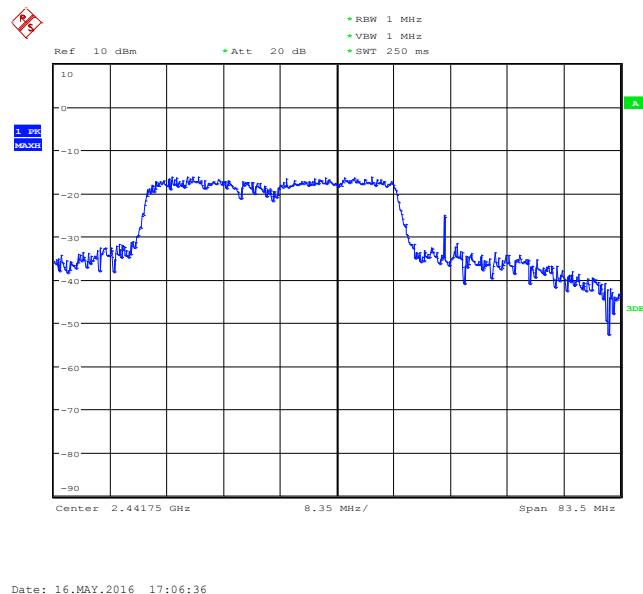
4.3 Dosažené výsledky a naměřené hodnoty

4.3.1 Zobrazení kmitočtového spektra

Jak pro pásmo 20 MHz, tak pro 40 MHz pásmo se na spektrálním analyzátoru podařilo zobrazit kmitočtová spektra, která odpovídají teoretickým spektrům. Tato část úlohy je jednodušší, s minimálním zásahem do zapojení. Podle návodu byl nastaven spektrální analyzátor, na vysílacím routeru nastavena šířka pásma 20 MHz, spektrum vykresleno a přímo z paměti analyzátoru uloženo na USB disk. V routeru byla pak šířka pásma změněna na 40 MHz a postup zopakován.



Obrázek 4-4 Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 20 MHz



Obrázek 4-5 Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 40 MHz

Pro každou šířku pásma se provedlo měření přenosové rychlosti přes rádiové prostředí bez jakýchkoliv překážek a s nulovým útlumem antén. Průměrné přenosové rychlosti byly poznačeny, z PC2 zjištěna rychlost připojení a následně určen aktuální MCS index.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro různou šířku pásma

Kmitočet	Průměrná přenosová rychlost	Rychlost připojení	MCS index
20 MHz	4600 kB/s	130 Mbps	MCS15
40 MHz	9000 kB/s	243 Mbps	MCS14

4.3.2 Měření přenosové rychlosti systému MIMO

Celé měření probíhalo pouze pro šířku pásma 20 MHz. Nejprve bylo provedeno měření při propojení AP a klienta přímo koaxiálními kabely, tedy přenos neprobíhal přes rádiové prostředí. Dosažená přenosová rychlost byla v průměru 3600 kB/s. Následné spojení pomocí antén, kdy přenos probíhal přes rádiové prostředí a signál do antén nebyl utlumen, ukázalo průměrnou přenosovou rychlost 4300 kB/s. Proto lze spojení koaxiálním kabelem, oproti rádiovému prostředí, považovat za útlum signálu.

Průměrná přenosová rychlost pro jednotlivá nastavení atenuátorů byla odečítána při FTP přenosu souboru mezi oběma PC. V laboratorní úloze nebyl proveden žádný zásah do firmware AP ani klientského USB Wi-Fi přijímače, tudíž nebylo z dostupných informací možné přesně určit aktuálně využitý MCS index. Aby bylo možné alespoň přibližně určit aktuální index, v informačním okně o stavu připojení Wi-Fi na PC2 byla sledována a zapisována aktuální rychlost připojení. Na základě této rychlosti se v tabulce MCS indexů dá jednoduše určit využívaný MCS index a tím pádem i modulace.

Po celou dobu měření byla sledována také odezva mezi oběma PC. Průměrná odezva pro každý stav utlumení antén byla vždy poznačena.

Při vzdálenosti routeru a USB Wi-Fi adaptéru menší než 1 metr však nedošlo k odpojení ani při nastavení maximálních útlumů všech atenuátorů. Průběžná kontrola spojení, pomocí příkazu ping v příkazovém řádku, ukázala pouze zvýšení odezvy, přenos souborů však pokračoval, i když velmi malou rychlostí. Toto lze přisoudit nedokonalému stínění jednotlivých prvků (aktivních i pasivních) v celém zapojení, tudíž signál je přijímán nejen anténami, ale i prvky mezi samotným zařízením a atenuátorem.

Vzdálenost mezi routerem a PC s USB Wi-Fi adaptérem byla tedy zvětšena na 4 metry. Nebylo použito žádné jiné překážky, mezi anténami bylo pouze rádiové prostředí bez rušení. Opakovaným měřením s postupným zvyšováním útlumů jednotlivých atenuátorů bylo zjištěno, že při nastavení maximálních útlumů na atenuátorech dojde k výpadkům spojení, při kterých již přenos pomocí FTP spojení není realizovatelný. Hodnoty tohoto měření byly zaznamenány a použity ve vypracovaném vzorovém protokolu.

Tabulka 12 Změřené hodnoty přenosové rychlosti a určení MCS indexu pro nastavený útlum antén systému

Útlum vloženého atenuátor u před anténu vysílače [dB]	Útlum vloženého atenuátor u před 1. anténou přijímače [dB]	Útlum vloženého atenuátor u před 2. anténu přijímače [dB]	Přenosová rychlost [kB/s]	Rychlost připojení [Mbps]	Aktuální MCS	Modulace dle MCS	Odezva [ms]
0	0	0	4600	130	15	64-QAM	<1
20	0	0	4300	104	13	64-QAM	1
40	0	0	4200	104	13	64-QAM	1
50	0	0	4200	78	12	16-QAM	1
50	20	0	3000	39	10	QPSK	5
50	40	0	2950	39	10	QPSK	10
50	60	0	2900	39	10	QPSK	14
50	80	0	3000	39	10	QPSK	22
50	80	10	2600	39	10	QPSK	28
50	80	20	250	11	8	BPSK	48
50	80	30	61	5,5	0	BPSK	108
50	80	40	53	5,5	0	BPSK	370
50	80	60	32	2	0	BPSK	1100
50	80	80	odpojeno				Time out

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nastudovat rodinu standardů 802.11 s podrobným zaměřením na standardy 802.11n a 802.11ac, rozdíly mezi nimi a na využití technologie MIMO. Dále pak navrhnout laboratorní úlohu pro studenty bakalářského studia, ve které se ověří vlastnosti MIMO systému.

První kapitola ve stručnosti obsahuje historii bezdrátového přenosu Wi-Fi včetně starších standardů 802.11a/b/g

Kapitola druhá je věnována standardům 802.11n a 802.11ac. U standardu 802.11n jsou popsány inovace oproti starším standardům. Nejvýznamnější změnou je zavedení technologie MIMO. Systémy MIMO dokážou vysílat a přijímat více datových toků současně při využití více antén na vysílači a přijímači. Pro standard 802.11n je maximální počet současně vysílaných prostorových streamů stanoven na 4. Zvýšení přenosové rychlosti je dále dosaženo rozšířením šířky pásma až na 40 MHz oproti stávajícím 20 MHz šířky pásma. Další novinkou u 802.11n je tvarování paprsku (beamforming), které dokáže, na základě dalších změn v modulaci, kódování dat, MCS schématech a rámcové agregaci, zefektivnit celý datový přenos a tím i dosáhnout vyšší přenosové rychlosti. Více zdrojů udává, že u starších standardů režie přenosu zaberou až 50% přenosové rychlosti oproti standardu 802.11n, kde režie zabírají cca 25% přenosové rychlosti. Standard 802.11ac je v podstatě postaven na vylepšení standardu 802.11n. Vyšší kvality datového přenosu je dosaženo zvýšením počtu souběžných prostorových streamů na 8 a rozšířením šířky přenosového pásma až na 160 MHz, ale standard je definován jen pro kmitočtové spektrum 5 GHz. V teoretické definici standardu 802.11ac je zavedena nová technologie MU-MIMO, která zatím v praxi není běžně využita kvůli časové náročnosti zpracovávaných procesů. Využita není ani celá šířka pásma 160 MHz, ani maximální počet souběžných prostorových streamů. Komerčně dostupná zařízení dnes dokážou pracovat s maximální šířkou pásma 80 MHz a zatím pouze se třemi souběžnými prostorovými streamy. Změna u 802.11ac nastala ve zjednodušení schémat MCS a definováním VHT rámce. V poslední části kapitoly jsou tabulky, které srovnávají oba standardy hlavně z pohledu maximální teoretické přenosové rychlosti a šířky pásma, ale také z hlediska podporovaných technologií.

Třetí kapitola ve stručnosti popisuje obslužný software, naprogramovaný v prostředí MATLAB. Připojená aplikace dokáže podle standardu nabídnout volbu šířky pásma, počet prostorových streamů a délku ochranného intervalu. Po zadání síly signálu a šumu v jednotkách dBm je vypočtena úroveň SNR a kapacita kanálu podle Shannon – Hartleyova vzorce, kapacita kanálu dle systému a očekávaná reálná rychlost systému – bez rámcové agregace a s agregací 1:5. Přesný výpočet by však byl velice složitý, protože by se musely spočítat ztráty na fyzické vrstvě - L1 (ztráty úrovně bezdrátového přenosu), ztráty na vrstvě linkové - L2 (režie rámců apod.) a ztráty na síťové vrstvě - L3. Dále ztráty mohou být způsobeny detekcí kolizí – aplikace s nimi nepočítá. Po vypočtení jednotlivých rychlostí lze konstatovat, že nárůst modulační rychlosti a nárůst přenosové rychlosti není lineární. Proto již v moderních standardech 802.11n a 802.11ac je navýšení přenosové rychlosti řešeno hlavně agregací rámců. Rámce však kvůli zvýšení rychlosti nelze agregovat do nekonečna, proto již protokol TCP tak, jak byl prvopočátečně navržen, není pro budoucí technologie dostačující.

Ve čtvrté kapitole je popsán návrh samotné laboratorní úlohy, která má za úkol

demonstrovat technologii MIMO. Pro potřeby laboratorní úlohy byl využit vysílací router (TP-LINK TL-WR1043ND) jako vysílač. Router má tři odnímatelné antény. Aby mohl být demonstrován MIMO systém 2x2, byl jeden SMA výstup zakončen terminátorem a jedna z antén připojena přes atenuátor. Jako přijímač byl použit USB Wi-Fi adaptér (Airlive X.USB-3), který měl před obě antény předřazený atenuátor. Postupným zvyšováním útlumů bylo docíleno systému SIMO (1x2) a SISO (1x1). Utlumením druhé antény USB adaptéru bylo docíleno rozpojení systému (1x0), ale pouze na krátkou dobu. Důvodem opětovného spojení je nedokonalé stínění přívodů a spojů za atenuátory, tudíž signál z 1 antény vysílače byl v malém množství (dostačujícím ke spojení) detekován USB adaptérem. Před samotným sestavením prvků podle schématu byl proměřen útlum jednotlivých prvků s následujícím výsledkem: útlum samotného atenuátoru = 5 dB, slučovač pro pásmo ISM – v přímém směru 5 dB, mezi vstupy 12 dB. V úloze by bylo vhodné na příslušném analyzátoru zobrazit konstelační diagram přenosu pro každý stupeň útlumu, aby bylo zřejmé, o jakou modulaci se jedná. Hodnoty MCS jsou určeny podle rychlosti připojení, kterou zobrazoval stav připojení notebooku Windows, což nemusí být zcela přesné.

O standardech IEEE 802.11n a 802.11ac je již vypracováno mnoho prací, rešerší a velká kvanta odborných textů. Celkově tuto problematiku nelze kompletně obsáhnout do jedné práce, proto je tato bakalářská práce pouze jakýmsi stručným náhledem, který má za úkol problematiku přiblížit a zmiňuje hlavní podstatu a nejdůležitější parametry daných standardů. V současnosti se již však pracuje na standardu novém – IEEE 802.11ax, který slibuje až čtyřnásobně vyšší přenosové rychlosti než jsou maximální teoretické rychlosti standardu 802.11ac.

LITERATURA

- [1] Wi-Fi. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-04]. Dostupné z WWW: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>>.
- [2] Mimo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-04]. Dostupné z WWW: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Mimo>>.
- [3] GAST, Matthew. *802.11n: a survival guide*. Sebastopol, CA: O'Reilly, c2012. ISBN 1449312047.
- [4] KELLY, Gordon. *802.11ac vs 802.11n Wi-Fi: What's The Difference?* [online], 2014, Dostupné z WWW: <<http://www.forbes.com/sites/gordonkelly/2014/12/30/802-11ac-vs-802-11n-wifi-whats-the-difference/>>.
- [5] *Teorie rádiové komunikace: Učebnice*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013 [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/>>.
- [6] *Přenosová kapacita radiokomunikačního kanálu*. [online]. Dostupné z WWW: <<http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/cdm/cdm1.html>>
- [7] STACH, L. *Spolupráca bunkových a nebunkových mobilných sietí*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií. Ústav radioelektroniky, 2010. 64 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Doc. Ing. Ľubomír Doboš, PhD.
- [8] HANUS, Stanislav. *Rádiové a mobilní komunikace: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2014. 129 s..
- [9] GAST, Matthew. *802.11ac: a survival guide*. Beijing: O'Reilly, 2013. ISBN 1449343147.
- [10] YONG SOO CHO .. [ET AL.]. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470825624.
- [11] VAN NEE, Richard, V. K. JONES, Geert AWATER, Allert VAN ZELST, James GARDNER a Greg STEELE. *The 802.11n MIMO-OFDM Standard for Wireless LAN and Beyond*. Wireless Personal Communications [online]. 2006, 37(3-4), 445-453 [cit. 2016-08-05]. DOI: 10.1007/s11277-006-9073-2. ISSN 0929-6212. Dostupné z WWW: <<https://pdfs.semanticscholar.org/2ef4/55b88c5552b63d90d4e0b916ee178f6e7f51.pdf>>
- [12] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace: Laboratorní úlohy - návod*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [13] *MCS index* tabulka. [online]. Dostupné z WWW: <<http://mcsindex.com/>>
- [14] *Tabulka časování paketového přenosu*. [online]. Dostupné z WWW: <https://sarwiki.informatik.hu-berlin.de/Package_transmission_time_in_802.11>
- [15] MIMO-OFDM In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-04] Dostupné z WWW: <<https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO-OFDM>>
- [16] SPONSOR, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. *IEEE*

standard for information technology telecommunications and information exchange between systems: local and metropolitan area networks--specific requirements. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. ISBN 9780738172453.

- [17] Hiden node problem In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-04] Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_node_problem>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>dB</i>	decibel, logaritmická jednotka
<i>dBm</i>	decibel-miliwatt, jednotka výkon v logaritmickém měřítku
<i>s</i>	časová veličina
<i>Hz</i>	Signál v časové oblasti.
<i>F</i>	Signál ve frekvenční oblasti.
b/s	Rychlost datového přenosu (počet bitů za sekundu)
kB/s	Rychlost datového přenosu (počet kilobytu za sekundu)
ACK	acknowledgment – potvrzovací paket
AP	Acces Point, přístupový bod
BER	Bit Error Rate
CP	Cyclic Prefix
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Inter-Frame Space, přenosový rámec
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FDM	Frequency Division Multiplex, typ modulace signálu
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTP	File Transport Protocol, protokol pro přenos souborů po síti
GI	Guard Interval
ICI	Inter Carrier Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific and Medical, pásmo pro radiové vysílání
LAN	Local Area Network, drátové síť
NDP	Null Data Packet
MAC	Media Acces Control
MCS	Modulation and Coding Set
MIMO	Multiple Input-Multiple Output technologie.
MPDU	Unit MAC Protocol Data

MSDU	MAC Service Data Unit
MU-MIMO	Multi-user Multiple Input–Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCC	Packet Binary Convolution Coding
PC	Personal Computer, osobní počítač
SIFS	Short Inter-Frame Space, přenosový rámec
SIMO	Single Input-Multiple Output technologie
SISO	Single Input-Single Output technologie.
STBC	Space Time Block Coding
SM	Spatial Multiplexing
SMA	SubMiniature version A konektor
SNR	Signal to Noise Ratio, poměr úrovně signálu k šumu
TCP	Transmission Control Protocol, protokol transportní vrstvy
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol, protokol zabezpečení sítě
USB	Universal Serial Bus, sériová sběrnice pro připojení periférií k PC
VHT	Very High Throughput
WEP	Wired Equivalent Privacy, protokol zabezpečení sítě
Wi-Fi	Wireless Fidelity, označení pro bezdrátový přenos
WPA	Wi-Fi Protected Access, protokol zabezpečení sítě

A VZOROVÉ VYPRACOVÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

A.1 Zadání laboratorní úlohy

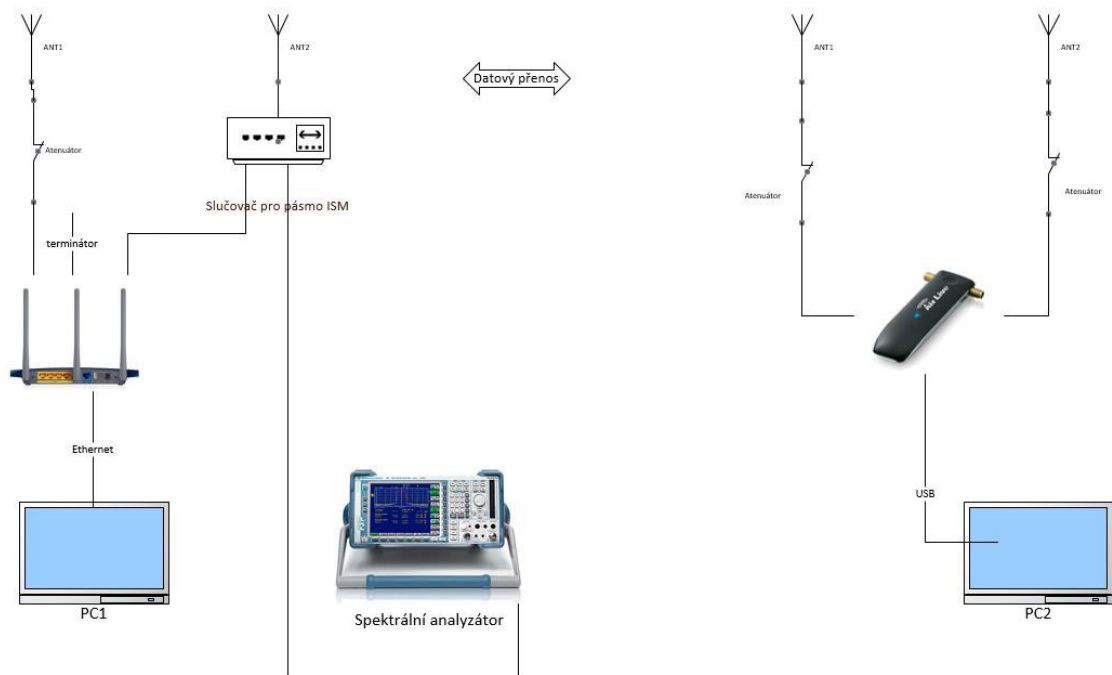
- 1) Prohlédněte si zapojení pracoviště pro měření. Seznamte se s měřenou technologií a obsluhou spektrálního analyzátoru.
- 2) Realizujte spojení pomocí Wi-Fi technologie, standard 802.11n (OFDM, MIMO 2x2). Stanovte průměrnou přenosovou rychlost a porovnejte kmitočtová spektra pro šířku pásma 20 MHz a následně pro šířku pásma 40 MHz.
- 3) Pomocí atenuátorů postupně zvyšujte útlum antény na vysílači a obou antén přijímače, stanovte průměrnou přenosovou rychlost pro všechny možnosti, na PC sledujte aktuální modulační rychlost pro určení aktuálního MCS indexu.
- 4) Při maximálním utlumení změňte polohu a natočení antén přijímače vůči vysílači. Změny sledujte v síle signálu Wi-Fi a rychlosti připojení na PC.
- 5) Ze získaných hodnot sestavte přehlednou zprávu o měření. Porovnejte přenosové rychlosti v závislosti na šířce pásma a nastavení MIMO systému. Rychlosti srovnajte s hodnotami z připojené aplikace a s teoretickými hodnotami. Rozdíly komentujte v závěru zprávy o měření.

Do konfigurace měřicího pracoviště nezasahujte, polohy kabelů neměňte

A.2 Teoretický úvod k laboratorní úloze a blokové schéma

Systém Wi-Fi se používá pro bezdrátové lokální sítě WLAN (Wireless Local Area Network). Vychází ze specifikace IEEE 802.11. Nejčastěji se Wi-Fi používá jako WLAN pro bezdrátové propojení přenosných zařízení nebo pro bezdrátové připojení do sítě Internet (jako technologie tzv. poslední míle). Použité kmitočtové pásmo, maximální vyzářený výkon a maximální přenosová rychlost závisí na typu standardu [12].

Standard 802.11n využívá pásmo ISM 2,4 GHz i pásmo 5 GHz, maximální teoretická přenosová rychlost je 600 Mbit/s a používá modulaci OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Vysokých přenosových rychlostí je dosaženo díky využití technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output). Maximální počet vysílačích x přijímacích antén je 4x4. Standard 802.11n pracuje se šířkou pásma až 40 MHz.



A.3 Postup měření

Zapněte oba notebooky (PC1, PC2) a vysílací router. Nastavte spektrální analyzátor:

- **FREQ** – START 2400 MHz, STOP 2483,5 MHz;
- **AMPT** – RF ATTN MANUAL 20 dB, REF LEVEL 10 dBm, RANGE LOG MANUAL 100 dB, UNIT dBm;
- **SWEEP** – SWEETIME MANUAL 250 ms
- **BW** – RES BW MANUAL 1 MHz, VIDEO BW MANUAL 1 MHz

Na PC1 spusťte webový prohlížeč a připojte se do konfiguračního rozhraní AP (IP: 192.168.1.1, jméno: admin, heslo: admin). V záložce *Wireless* → *Wireless settings* zkontrolujte a případně nastavte: SSID – lab_707, Channel – 7, Mode – 11bgn mixed, Channel width – 20 MHz. Po provedení změn klikněte na tlačítko Save, pokud změna vyžaduje restart zařízení, vyskočí odkaz na Reboot ve sdělení nad tlačítkem Save. Následně vyčkejte, než se zařízení znovu načte. Prohlédněte si jednotlivé záložky a možnosti nastavení zařízení, neprovádějte však žádné další změny. PC2 připojte pomocí USB Wi-Fi adaptéru k síti lab_707, v menu Windows – centrum sítí a sdílení – Wi-Fi stav zobrazte a zapište aktuální rychlost připojení a spusťte FTP server. Na PC1 spusťte program Total Commander a připojte se na FTP server, běžící na PC2. Přeneste libovolný soubor mezi notebooky (nejlépe větší než 20 MB + přepsat již přenesený soubor). Po zahájení přenosu spusťte na spektrálním analyzátoru paměťový mód:

- **TRACE** – DETECTOR – DETECTOR MAX PEAK,

- **TRACE – SELECT TRACE – 1, CLEAR/WRITE, MAX HOLD**

Poznamenejte si průměrnou přenosovou rychlost signálu při přenosu v kB/s. Postupně se zobrazí celé kmitočtové spektrum. Výsledné kmitočtové spektrum je možné uložit jako soubor *.bmp na USB disk volbou **HCOPY – PRINT SCREEN**. Přes konfigurační rozhraní AP nastavte šířku pásma na 40 MHz a proces opakujte [12].

3) V AP nastavte šířku pásma zpět na 20 MHz. V PC1 spusťte příkazový řádek (Start → Spustit → cmd) a zadejte příkaz: ping 192.168.1.16 -t [Enter]; tím dojde ke spuštění nekonečného opakování dotazu na odezvu k PC2. Postupně zvyšujte útlum antény nejprve u vysílače, pak u obou antén přijímače. Krok útlumu nastavujte cca 20 dB, u druhé antény přijímače postupujte s krokem 10 dB. Po změně vždy proveďte přenos souboru přes FTP, poznačte průměrnou přenosovou rychlost FTP přenosu, ve stavu připojení Wi-Fi na PC2 zkontrolujte aktuální rychlost připojení, pomocí které v přiložené tabulce MCS indexů určete aktuální MCS. Sledujte také odezvu.

4) Ponechejte všechny atenuátory nastaveny na maximální útlum. Změňte polarizaci antén přijímače nebo vysílače, pak změňte polohu jedné z antén. Sledujte odezvu a rychlost připojení na PC2. Změny okomentujte ve zprávě o měření.

Po skončení měření zrušte relaci FTP a vypněte vysílací router.

B VZOROVÝ PROTOKOL

 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ		Předmět KRMK – Rádiové a mobilní komunikace	
		Jméno Jan ALEXA	Obor EST
		Ročník X.	Měřeno dne <u>DD.MM.RRRR</u>
		Spolupracoval	Hodnocení
Číslo úlohy X.	Název úlohy Ověření vlastností standardu WiFi IEEE 802.11n		

Zadání:

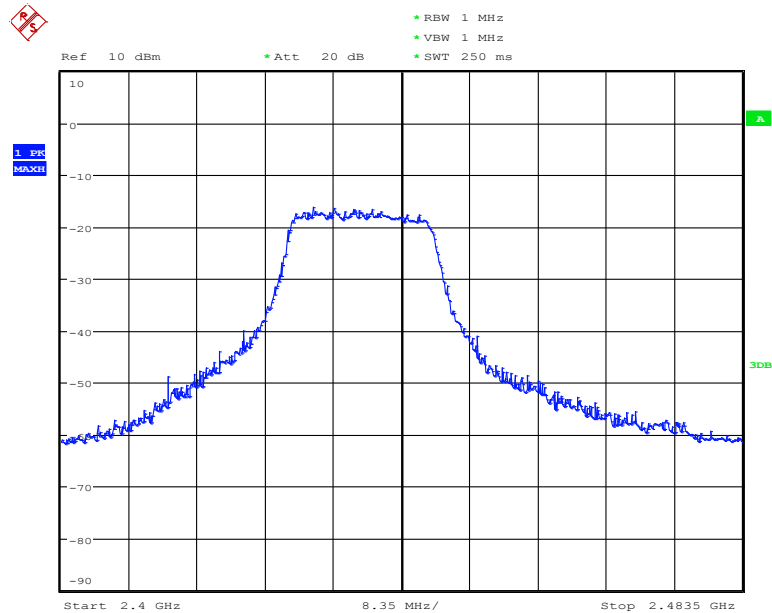
- 1) Prohlédněte si zapojení pracoviště pro měření. Seznamte se s měřenou technologií a obsluhou spektrálního analyzátoru.
- 2) Realizujte spojení pomocí Wi-Fi technologie, standard 802.11n (OFDM, MIMO 2x2). Stanovte průměrnou přenosovou rychlost a porovnejte kmitočtová spektra pro šířku pásma 20 MHz a následně pro šířku pásma 40 MHz.
- 3) Pomocí atenuátorů postupně zvyšujte útlum antény na vysílači a obou antén přijímače, stanovte průměrnou přenosovou rychlost pro všechny možnosti, na PC sledujte aktuální modulační rychlost pro určení aktuálního MCS indexu.
- 4) Při maximálním utlumení změňte polohu a natočení antén přijímače vůči vysílači. Změny sledujte v síle signálu Wi-Fi a rychlosti připojení na PC.

Ze získaných hodnot sestavte přehlednou zprávu o měření. Porovnejte přenosové

Zpracování:

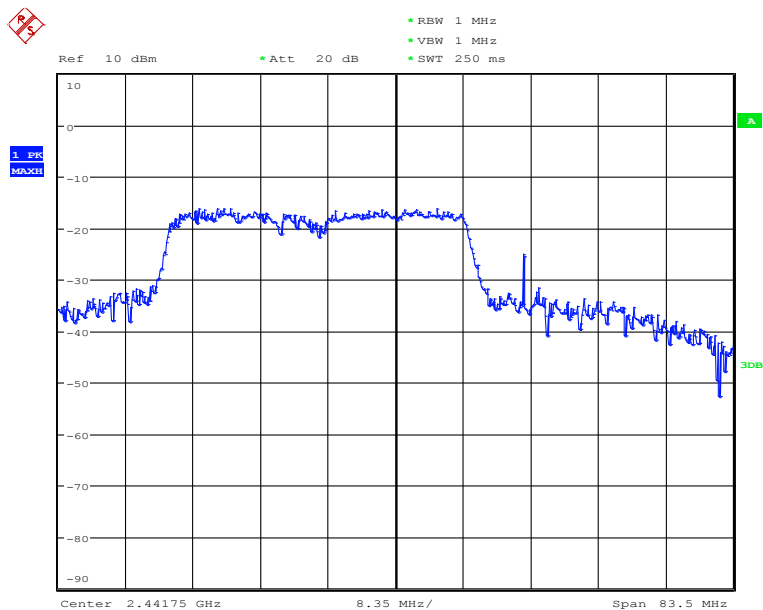
2) Měření Wi-Fi standardu 802.11n v závislosti na šířce pásma

Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 20 MHz:



Date: 16.MAY.2016 17:33:03

Kmitočtové spektrum pro šířku pásma 40 MHz:



Date: 16.MAY.2016 17:06:36

Měření přenosové rychlosti a určení MCS:

Kmitočet	Průměrná přenosová rychlost	Rychlost připojení	MCS index
20 MHz	4600 kB/s	130 Mbps	MCS15
40 MHz	9000 kB/s	243 Mbps	MCS14

3) Měření rychlostí Wi-Fi v závislosti na útlumu antén

Měření přenosové rychlosti a určení MCS v závislosti na nastavení útlumu antén:

Útlum vloženého atenuátor u před antény vysílače [dB]	Útlum vloženého atenuátor u před 1. antény přijímače [dB]	Útlum vloženého atenuátor u před 2. antény přijímače [dB]	Přenosová rychlost [kB/s]	Rychlost připojení [Mbps]	Aktuální MCS	Modulace dle MCS	Odezva [ms]
0	0	0	4600	130	15	64-QAM	<1
20	0	0	4300	104	13	64-QAM	1
40	0	0	4200	104	13	64-QAM	1
50	0	0	4200	78	12	16-QAM	1
50	20	0	3000	39	10	QPSK	5
50	40	0	2950	39	10	QPSK	10
50	60	0	2900	39	10	QPSK	14
50	80	0	3000	39	10	QPSK	22
50	80	10	2600	39	10	QPSK	28
50	80	20	250	11	8	BPSK	48
50	80	30	61	5,5	0	BPSK	108
50	80	40	53	5,5	0	BPSK	370
50	80	60	32	2	0	BPSK	1100
50	80	80	odpojeno				Time out

Závěr:

V první části měření bylo zobrazeno kmitočtové spektrum pro šířku pásma 20 MHz a 40 MHz. Pro obě šířky pásma byly stanoveny průměrné přenosové rychlosti, zjištěny rychlosti připojení a z nich se následně určilo využitý MCS index.

Druhá část laboratorní úlohy demonstruje chování MIMO technologie. Pomocí attenuátorů je docíleno nejprve systému 1x2 (MISO), pak 1x1 (SISO) a následné utlumení

až do přerušení spojení. Z naměřených hodnot je patrné, jaký vliv má počet antén na straně vysílače a přijímače na přenosovou rychlost. Utlumováním druhé antény na přijímači lze simulovat například prodlužování vzdálenosti mezi AP a klientem, nebo zvětšováním překážky mezi nimi. S postupným utlumováním narůstá také odezva mezi oběma body. Po rozpojení signálu došlo k opětovnému spojení, což bylo pravděpodobně způsobeno malou vzdáleností mezi body a nedokonalou izolací vř prvků v přijímači, tudíž signál byl přijímán i mezi přijímačem a atenuátorem.

V poslední části laboratorní úlohy bylo zjištěno, že poloha a polarizace antén má vliv na kvalitu signálu. Za maximálního provozuschopného utlumení se při změně pozice antény měnila rychlost připojení mezi 2 Mbps, a 11 Mbps, což odpovídá změně z MCS0 na MCS1.